الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Électrotechnique

N° :……/2026

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE: Sciences et Technologies

FILIERE: Électrotechnique

SPECIALITE: Commande Électrique

Thème

Etude et Régulation d'un système de charge et décharge d'une batterie au Lithium-Ion

Présenté Par : -CHATER Imane

-BOUAMOUCHA Riham

Encadré Par : MAOUCHE Abdelaziz

Date de soutenance : 30/06/2026

Jury de Soutenance

Président : LALILI Djaafer	**Grade : Prof**	**Univ MSB jijel**
Encadreur : MAOUCHE Abdelaziz	**Grade : MCB**	**Univ MSB jijel**
Examinateur1 : LOURCI Nabil	**Grade : MCB**	**Univ MSB jijel**

Promotion : 2025 /2026

Résumé

La batterie lithium-ion constitue aujourd'hui l'une des solutions les plus utilisées pour le stockage d'énergie grâce à sa forte densité énergétique, sa longue durée de vie et ses bonnes performances. Les travaux de ce mémoire s'articulent autour des axes suivants :

- Une première étape consiste à étudier les batteries lithium-ion, leurs principes de fonctionnement, leurs caractéristiques ainsi que leurs différents modèles de simulation. Une modélisation de la batterie est ensuite réalisée sous MATLAB/Simulink afin d'analyser son comportement en charge et en décharge.
- Dans une seconde étape, nous présentons les convertisseurs DC-DC bidirectionnels utilisés pour le transfert d'énergie entre la source et la batterie. Enfin, une stratégie de commande basée sur un régulateur PID est développée afin d'assurer la régulation du système et d'améliorer ses performances dynamiques.

Les résultats de simulation obtenus montrent que la stratégie de commande proposée permet d'assurer une charge et une décharge stables de la batterie, avec une excellente précision de régulation.

Mots-clés : Batterie lithium-ion, Charge/Décharge, Convertisseur DC-DC bidirectionnel, Modélisation, Régulation PID, MATLAB/Simulink, Stockage d'énergie.

Abstract

A lithium-ion battery is one of the most widely used energy storage technologies due to its high energy density, long lifetime, and excellent performance. The work presented in this dissertation is organized around the following points:

- The first step consists of studying lithium-ion batteries, their operating principles, characteristics, and various simulation models. A battery model is then developed using MATLAB/Simulink to analyze its charging and discharging behavior.
- The second step presents the bidirectional DC-DC converters used for energy transfer between the power source and the battery. Finally, a PID control strategy is designed to regulate the system and improve its dynamic performance.

The simulation results confirm that the proposed control strategy ensures stable charging and discharging of the battery, with excellent regulation accuracy.

Keywords: Lithium-ion battery, Charging/Discharging, Bidirectional DC-DC converter, Modeling, PID control, MATLAB/Simulink, Energy storage.

ملخص

تعد بطارية الليثيوم-أيون اليوم إحدى أكثر تقنيات تخزين الطاقة استخداماً بفضل كثافتها الطاقوية العالية، طول عمرها التشغيلي، وأدائها المتميز. ويرتكز هذا العمل على المحاور التالية:

- تتمثل الخطوة الأولى في دراسة بطاريات الليثيوم-أيون، مبادئ عملها، خصائصها، ومختلف نماذج المحاكاة الخاصة بها. بعد ذلك، تم تطوير نموذج محاكاة للبطارية باستعمال بيئة MATLAB/Simulink لتحليل سلوكها أثناء عمليتي الشحن والتفريغ.
- في الخطوة الثانية، تم تقديم المحولات المستمرة-المستمرة (DC-DC) ثنائية الاتجاه المستخدمة لنقل الطاقة بين المصدر والبطارية. وأخيراً، تم تطوير استراتيجية تحكم تعتمد على منظم PID لضمان تنظيم النظام وتحسين أدائه الديناميكي.

أظهرت نتائج المحاكاة أن استراتيجية التحكم المقترحة تضمن شحناً وتفريغاً مستقرين للبطارية، مع دقة تنظيم ممتازة.

الكلمات المفتاحية :بطارية الليثيوم-أيون، الشحن/التفريغ، محول DC-DC ثنائي الاتجاه، النمذجة، التحكم الرقميPID ، بيئة MATLAB/Simulink ، تخزين الطاقة.

Remerciement

Nous rendons grâce à Dieu, Le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Nous exprimons notre plus profonde gratitude à notre encadrant, Monsieur **Maouche Abdelaziz**, pour son accompagnement rigoureux, sa disponibilité constante, la qualité de ses conseils et son soutien précieux tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements vont également à Monsieur **Moussa Lefouili**, ex-chef du département d'Électrotechnique, pour son encadrement bienveillant, ses encouragements constants et son engagement envers la réussite des étudiants.

Notre reconnaissance s'adresse aussi à l'ensemble des enseignants de la filière Électrotechnique, qui ont enrichi nos connaissances théoriques et pratiques durant tout notre parcours universitaire.

Enfin, nous adressons nos remerciements sincères à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce projet par un conseil, une aide ou un mot d'encouragement.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mon père,

À ma mère,

À ma petite sœur,

À mes frères.

Àmes copines Rania et Nacera, et tous mes amies

Àtous mes enseignants Et à tous ceux qui m'ont soutenue.

Riham

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mon père,

À ma mère,

À ma petite sœur,

À mes frères.

À ma chère copine Safia, et tous mes amies

À tous mes enseignants Et à tous ceux qui m'ont soutenue.

Imane

Liste des figures

Chapitre I

Figure (I.1)	Principaux éléments d'une cellule de batterie	03
Figure (I.2)	Principe de fonctionnement d'une cellule de batterie	05
Figure (I.3)	Charge et décharge de la batterie au plomb	05
Figure (I.4)	Charge et décharge des batteries nickel-cadmium	06
Figure (I.5)	Charge et décharge des batteries nickel-métal-hydrure	07
Figure (I.6)	Charge et décharge d'une batterie lithium-ion	07
Figure (I.7)	Différents formats de cellules (cylindrique, prismatique et poche	10
Figure (I.8)	Liaison en série des batteries	11
Figure (I.9)	Liaison en parallèle des batteries	11
Figure (I.10)	La tension d'une cellule au pack batterie	12
Figure (I.11)	Une batterie au Lithium (Li-ion), Tension 40V, Capacité Nominale 40Ah, Constitué de 11 Cellules montés en série	
Figure (I.12)	Principe de fonctionnement de la batterie lithium-ion	13
Figure (I.13)	La tension à vide (OCV) aux bornes d'une cellule (Li-ion) en fonction du SOC	15
Figure (I.14)	La résistance interne (DCR) d'une cellule (Li-ion) en fonction du SOC et la T°	16
Figure (I.15)	Modèle de batterie (E0, R)	17
Figure (I.16)	Modèle de batterie (E0, R, C)	17
Figure (I.17)	Modèle Thévenin (premier ordre)	18
Figure (I.18)	Modèle de Thévenin (deuxième ordre)	19
Figure (I.19)	Évolution de la température en fonction du temps pendant la simulation	21
Figure (I.20)	Variables d'une Cellule de batterie obtenue en utilisant les différents modèles	22
Figure (I.21)	Zoom pour voir les réponses transitoire des différents modèles	24
Figure (I.22)	Influence de la résistance de charge sur les performances de la batterie lithium-ion	25
Figure (I.23)	Variables de la batterie lithium-ion durant le processus de décharge	27

Chapitre II

Figure (II.1)	Les différents types des convertisseurs	29
Figure (II.2)	Types de convertisseurs DC/DC	31
Figure (II.3)	Schéma électrique de base du convertisseur Buck	32

Figure (II.4)	Modes de fonctionnement du convertisseur Buck	33
Figure (II.5)	Signal d (rapport 37%), tension et courant de sortie d'un convertisseur Buck	35
Figure (II.6)	Schéma électrique de base du convertisseur Boost	36
Figure (II.7)	Modes de fonctionnement du convertisseur Boost	36
Figure (II.8)	Signal d (rapport 50%), tension et courant de sortie d'un convertisseur Boost	39
Figure (II.9)	Schéma électrique de base du convertisseur Buck-Boost	40
Figure (II.10)	Modes de fonctionnement du convertisseur Buck-Boost	40
Figure (II.11)	Schéma électrique du convertisseur Buck-Boost avec deux condensateurs	42
Figure (II.12)	Signal d (rapport 50%), tension et courant de sortie d'un convertisseur Boost	44
Figure (II.13)	Classification simplifiée d Classification simplifiée des convertisseurs de puissance DC es convertisseurs de puissance DC-DC bidirectionnels	46
Figure (II.14)	Schéma principale d'un convertisseur bidirectionnel isolé	47
Figure (II.15)	Schéma principale d'un convertisseur bidirectionnel Schéma principale d'un convertisseur bidirectionnel Schéma principale d'un convertisseur bidirectionnel non-isolé	47
Figure (II.17)	(a) NBDC de base et NBDC de base et (b) formes d'onde de fonctionnement	49
Figure (II.18)	Configuration a deux NBDC reliés dos à dos deux NBDC reliés dos à dos	49
Figure (II.19)	Configuration du convertisseur NBDC pour le mode charge de la batterie	50
Figure (II.20)	Configuration du convertisseur NBDC pour le mode décharge	51
Figure (II.21)	Evolution de la température en fonction du temps	53
Figure (II.22)	Variation de rapport d et du signal de commande d	53
Figure (II.23)	Evolution du SOC, du courant et de la tension de la batterie en mode charge et décharge	54
Figure (II.24)	Évolution du rapport d et du signal de commande de convertisseur bidirectionnel	56
Figure (II.25)	la variation du SOC, le courant et la tension de la batterie	57

Chapitre III

Figure (III.1)	Schéma principale de système de charge/décharge des batteries	60
Figure (III.2)	Schéma de principe d'une boucle fermée à base d'un PID	61

Figure (III.3)	Schéma général de la commande PID en boucle fermée d'un convertisseur Buck	62
Figure (III.4)	Évolution du rapport cyclique, de la tension de sortie et du courant de l'inductance du convertisseur Buck sous commande PID	65
Figure (III.5)	Évolution du rapport cyclique et du signal de commande du convertisseur Buck sous régulation PID	66
Figure (III.6)	Schéma général de la commande PID en boucle fermée du convertisseur Boost	67
Figure (III.7)	Schéma général de la commande PID en boucle fermée du convertisseur Boost	68
Figure (III.8)	Évolution du rapport cyclique, de la tension d'entrée, de la tension de sortie et du courant de l'inductance du convertisseur Boost sous commande PID	70
Figure (III.9)	Évolution du signal de commande du convertisseur Boost sous régulation PID	71
Figure (III.10)	Évolution des tensions et des courants du convertisseur Buck-Boost sous commande PID	73
Figure (III.11)	Structure globale du système de charge de la batterie	75
Figure (III.12)	Structure globale du système de charge de la batterie	76
Figure (III.13)	Schéma Simulink du système de charge/decharge de la batterie	78
Figure (III.14)	Tension de décharge de la batterie. (a) pour le courant nominale de décharge I (n = 4.4 A), (b) pour trois autres valeur du courant bat	80
Figure (III.15)	Tension de décharge de la batterie en fonction de la capacité CN	81
Figure (III.16)	évaluation de l'état de charge (SOC), le courant de la batterie (Ibat), et la capacité (CN)	82
Figure (III.17)	évolution de la tension de batterie ; la tension de charge	83
Figure (III.18)	L'évolution de l'état de charge, le courant de batterie en mode charge et en mode décharge	84
Figure (III.19)	L'évolution de l'état de charge, le courant de batterie en mode charge et en mode décharge	84
Figure (III.20)	l'évolution de l'état de charge, le courant de batterie et la capacité en mode charge et en mode décharge	86
Figure (III.21)	l'évolution de la tension d'entrée (Vin), la tension de batterie et la tension de charge en mode charge et en mode décharge	87

Liste des Tableaux

Tableau I.1	Tableau comparatif des différents types de batterie	8
Tableau I.2	Caractéristiques de la Batterie utilisée	20
Tableau II.1	Caractéristiques du système de charge/décharge avec d'une batterie	52
Tableau III.1	Paramètres du régulateur PID à définir à partir des paramètres du point critique	69
Tableau III.2	Caractéristiques du système convertisseur-batterie	79

Table des Matières

Résumé i
Liste des figures ii
Liste des tableaux v

Introduction générale 1

Chapitre I
Etude et Modélisation des Batteries au Lithium-Ion

I.1.Introduction 3
I.2. Définition des batteries 3
I.3. Historiques 4
I.4. Principe de fonctionnement 4
I.5. Types des batteries 5
I.5.1. Batterie au Plomb-Acide 5
I.5.2. Batterie Nickel – Cadmium 6
I.5.3. La Batterie Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH) 6
I.5.4. Batterie Lithium-ion (Li-ion) 7
I.6. Comparaison entre les différents types de batteries 8
I.7. Caractéristique des batteries 9
I.8. Structures, liaisons et architecture de batterie 10
I.8.1.Structure de batterie 10
I.8.2. Liaisons des batteries 10
I.8.3. Architecture interne des batteries 11
I.9. Etude de la batterie au Lithium-ion 12
I.9.1. Principe de fonctionnement 13
I.9.2. Avantages et inconvénients des batteries Lithium-ion 14
I.10. Modélisation de la batterie lithium-ion 14
I.10.1. Etat de charge d'une cellule de la batterie (SOC) 15
I.10.2. La tension fournie par une cellule 15
I.10.3. Modèle statique d'une batterie 17
I.10.4. Modèles dynamiques d'une batterie 17
I.10.5. Modèle de Thévenin du premier ordre 18
I.10.6. Modèle de Thévenin du deuxième ordre 18
I.11. Étude de simulation sous MATLAB/Simulink 19
I.12. Conclusion 28

Chapitre II
Etude des convertisseurs Bidirectionnels et Association avec Batterie

II.1. Introduction 29
II.2. Les convertisseurs statiques 29
II.2.1. Convertisseur alternatif/continu (redresseur) 30
II.2.2. Convertisseur continu/alternatif (onduleur) 30
II.2.3. Convertisseur alternatif/alternatif (Gradateur) 30
II.2.4. Convertisseurs continu/continu (Hacheur) 30
II.3. Généralités sur les convertisseurs DC/DC 30
II.3.1. Application des convertisseurs DC/DC 30
II.3.2. Types des convertisseurs DC/DC 31
II.4. Convertisseurs DC/DC non réversibles 31
II.4. 1. Hacheur série (convertisseur Buck) 32
II.4.1.1. Principe de fonctionnement et modélisation 32
II.4.1.2. Dimensionnement du convertisseur Buck 34
II.4.1.3. Exemple pour simulation 35
II.4. 2. Hacheur parallèle (Convertisseur Boost) 36
II.4.2.1. Principe de fonctionnement et modélisation 36
II.4.2.2. Dimensionnement du convertisseur Boost 38
II.4.2.3. Exemple pour simulation 39
II.4. 3. Hacheur série-parallèle (Convertisseur Buck-Boost) 40
II.4.3.1. Principe de fonctionnement et modélisation 40
II.4.3.2. Dimensionnement du convertisseur Buck-Boost 42
II.4.3.3. Exemple pour simulation 43
II.5. Convertisseurs DC/DC réversibles (Bidirectionnels) 45
II.5.1. Types des convertisseurs DC-DC bidirectionnel 45
II.5.1.1. Convertisseurs isolés bidirectionnels (IBDC) 46
II.5.1.2. Convertisseurs BDC non-isolé 47
II.5.2. Circuits NBDC monophasés 48
II.5.2.1. Principes des circuits NBDC monophasés 48
II.5.2.2. Configurations du système pour la charge/décharge d'une batterie 50
II.5.3. Simulation d'un système pour la charge/décharge d'une batterie 52
I.6. Conclusion 58

Chapitre III

Commande d'un système de charge/décharge d'une batterie

III.1. Introduction 59
IIII.2.Présentation du système de charge/décharge des batteries 59
III.3. Stratégie de commande des convertisseur DC-DC 61
III.3.1. Régulateur PID pour convertisseurs abaisseurs, Buck 61
III.3.2. Régulateur PID pour convertisseurs élévateur, Boost 66
III.3.3. Régulateur PID pour convertisseurs Buck-Boost 71
III.3.1.3. Exemple de simulation 73
III.4.Commande d'un système de charge et de décharge d'une batterie 74
III.4.1. Présentation du système 75
III.4.2. Simulation du système bouclé 79
III.5. Conclusion 88
Conclusion Générale 89
Références bibliographiques 90

Introduction Générale

Le développement rapide des systèmes énergétiques modernes ainsi que l'augmentation de la demande en solutions de stockage d'énergie performantes ont conduit à une utilisation croissante des batteries rechargeables, notamment les batteries Lithium-Ion. Grâce à leur densité énergétique élevée, leur longue durée de vie et leurs performances remarquables, ces batteries occupent aujourd'hui une place essentielle dans de nombreuses applications telles que les véhicules électriques, les systèmes photovoltaïques, les équipements électroniques portables et les réseaux intelligents, [1],[2]. Toutefois, l'utilisation efficace des batteries nécessite des systèmes capables d'assurer une gestion optimale des échanges d'énergie lors des phases de charge et de décharge. Pour répondre à cette exigence, les convertisseurs électroniques de puissance jouent un rôle fondamental en permettant l'adaptation des niveaux de tension et de courant tout en garantissant un rendement énergétique élevé. Parmi ces dispositifs, les convertisseurs DC-DC bidirectionnels sont particulièrement intéressants parce qu''ils permettent le transfert de l'énergie dans les deux sens, depuis la source vers la batterie pendant la charge et depuis la batterie vers la charge pendant la décharge, [17], [18]. Par ailleurs, les performances globales du système dépendent fortement de la stratégie de commande adoptée. En effet, les variations des conditions de fonctionnement, les perturbations ainsi que les contraintes imposées par les batteries exigent la mise en œuvre de techniques de régulation capables d'assurer la stabilité du système, la précision du suivi des références et la réduction des erreurs statiques, [20], [21]. Dans ce contexte, le régulateur PID demeure l'une des solutions les plus utilisées grâce à sa simplicité de mise en œuvre, sa disponibilité et son efficacité dans de nombreuses applications industrielles, [23]. L'objectif principal de ce travail est l'étude, la modélisation et la commande d'un système de charge et de décharge basé sur une batterie Lithium-Ion associée à des convertisseurs DC-DC bidirectionnel. Cette étude à comme objectif d'analyser le comportement dynamique du système, de concevoir une stratégie de commande adaptée et d'évaluer ses performances à travers des simulations réalisées sous l'environnement Matlab/Simulink.

Dans le premier chapitre, une étude détaillée des batteries est réalisée en présentant leurs principes de fonctionnement, leurs différentes types et technologies ainsi que leurs caractéristiques électriques et énergétiques. Une attention particulière est accordée aux batteries Lithium-Ion en raison de leurs avantages techniques et de leur large utilisation dans

les systèmes modernes de stockage d'énergie. Cette partie comprend également la présentation des différents modèles permettant de représenter leur comportement dynamique.

Dans le deuxième chapitre, l'étude porte sur les convertisseurs électroniques de puissance utilisés dans les systèmes de stockage d'énergie. Après une présentation générale des convertisseurs statiques, les principales structures des convertisseurs DC-DC sont analysées, notamment les convertisseurs Buck, Boost et Buck-Boost, leurs principes de fonctionnement, leurs modèles mathématiques ainsi que leurs méthodes de dimensionnement qui sont développés afin de comprendre leur rôle dans l'adaptation énergétique entre la batterie et la charge.

Le chapitre trois, est consacrée à la commande du système de charge et de décharge. Les modèles dynamiques des convertisseurs sont exploités pour déterminer leurs fonctions de transfert et concevoir des régulateurs PID adaptés. Une étude en boucle fermée est réalisée afin d'améliorer les performances du système en termes de stabilité, de rapidité de réponse et de précision de régulation.

Les résultats de simulation obtenus permettent de valider l'efficacité de la stratégie de commande proposée et de mettre en évidence son aptitude à assurer un fonctionnement fiable et performant du système de charge et de décharge d'une batterie au Lithium.

Ainsi, ce travail est une contribution dans l'étude des systèmes de gestion d'énergie basés sur les batteries Lithium-Ion et les convertisseurs bidirectionnels.

Chapitre I

Etude et Modélisation des Batteries au Lithium-Ion

I.1. Introduction

Les batteries rechargeables constituent des dispositifs conçus pour stocker de l'énergie électrique sous une forme continue, en utilisant une technique de conversion d'énergie réversible. Ces batteries sont cruciales pour alimenter des appareils autonomes, car elles permettent de stocker l'énergie électrique produite par les réactions chimiques et de la réutiliser sous forme de courant. Ce chapitre présente une étude détaillée des batteries avec présentation des différents types et caractéristiques de chaque type de batteries (ou piles), leurs principes de fonctionnement, et leur architecture interne et composition. En plus, à travers ce chapitre nous allons présenter plusieurs modèles dynamiques qui représentent le comportement de batterie à base de Lithium-ion, le type que nous avons choisis et donner plus d'importance vue ses caractéristiques et avantages que nous allons présenter par la suite.

I.2. Définition des batteries

Une batterie est un dispositif électrochimique qui stocke de l'énergie électrique sous forme chimique et la convertit en énergie électrique lorsqu'il sera nécessaire. Elle est constituée d'un ou plusieurs éléments électrochimiques (Cellule, compartiment ou chambre) qui contiennent des électrodes nommés anode et cathode immergés dans un électrolyte, avec un séparateur à l'intérieur qui empêche les électrodes de se toucher. La figure suivante représente les éléments d'une cellule d'une batterie à base de plombe-acide.

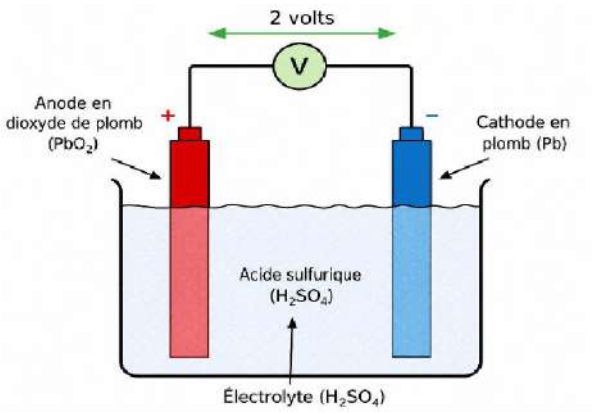


Figure I.1 : Principaux éléments d'une cellule de batterie, [1].

Lorsque la batterie est connectée à un circuit électrique, une réaction électrochimique se produit à l'intérieur de la batterie, produisant ainsi de l'électricité, pour le cas d'une cellule plombe-acide, elle développe une tension d'environ 2 volts. Les batteries sont utilisées dans de nombreuses applications, [2].

I.3. Historiques

Les premiers systèmes de stockage électrochimique sont les piles ou systèmes primaires non rechargeables tel que la pile Volta, créée en 1801. Il existe aujourd'hui une grande variété de piles. Par la suite, des piles rechargeables ont été développées ; c'est ce qu'on appelle communément : batterie.

En 1802, c'est le Docteur William Cruikshank qui était à l'origine de la conception de la première batterie électrique non rechargeable produite en série. En effet, il arrangea des feuilles carrées de cuivre soudées à leurs extrémités et il les a intercalés avec des feuilles de zinc de même taille. Le tout est placé dans une longue boîte rectangulaire en bois qui était ensuite refermée. Son étanchement est assuré à l'aide de ciment. Il a utilisé des encoches à l'intérieur de la boîte pour maintenir les plaques métalliques bien en place. L'ensemble, dans la boite baigne dans une solution aqueuse salée (saumure) ou d'acide dilué. En 1859, Le physicien français Gaston Planté a inventé la première batterie rechargeable (batterie secondaire). Elle était basée sur un couple chimique acide plomb, qui est toujours utilisée de nos jours. Rappelons quelque fait historique concernant les piles/batteries : en 1836, Daniell inventa la pile Daniell, en 1868, Leclanché inventa la pile Leclanché, en 1888, Gassner élabora les éléments de la pile sèche, en 1899, Waldmar Jungner inventa la batterie au nickel-cadmium, en 1901, Edison inventa la batterie au nickel-fer, en 1947, Neumann réussit à étanchéifier complètement de la batterie NiCd. La recherche sur les batteries à base de Ni-MH a commencé dans les années 1970. Par la suite, des nouveaux alliages d'hydrures ont été développés dans les années 1980 et qui ont amélioré leur stabilité. Le Ni-MH est devenu disponible commercialement dans les années 1990. En1999 la batterie Li-ion polymère fut commercialisée.[1]

I.4. Principe de fonctionnement

Toutes les batteries, malgré la diversité de leurs matériaux, fonctionnent selon le même principe de réaction d'oxydoréduction. Elles sont conçues pour que la réaction redox, favorable sur le plan énergétique, ne se produise que lorsque les électrons se déplacent à travers la partie externe du circuit. Ainsi, la cathode et l'anode sont maintenues séparées afin d'éviter une réaction spontanée. Lorsqu'un circuit est fermé, par exemple en allumant un appareil, les électrons stockés s'écoulent. C'est cette circulation d'électrons qui constitue l'électricité. La batterie transforme donc l'énergie chimique stockée en énergie électrique via un processus électrochimique, fournissant une force électromotrice pour les courants dans les circuits électriques et électroniques, [1].

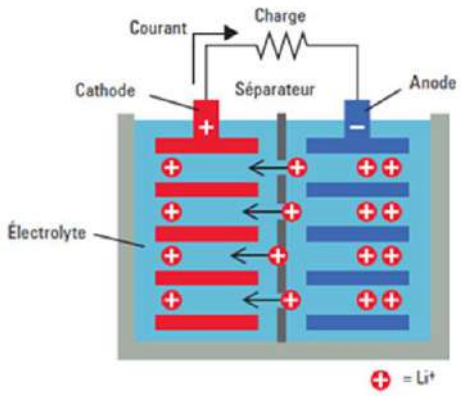


Figure I.2 : Principe de fonctionnement d'une cellule de batterie, [1].

I.5. Types des batteries

Il existe plusieurs types de batteries, chacun ayant sa technologie et matériaux utilisés, ayant ses avantages et ses inconvénients en fonction de leur utilisation, mais surtout ses caractéristiques électriques qui développent, durée de vie, prix etc. Dans ce qui suit, nous allons présenter les principaux et les types de batterie les plus utilisés. [3]

I.5.1. Batterie au Plomb-Acide

Il s'agit de la technologie de batterie la plus ancienne et la moins coûteuse à l'heure actuelle. Inventée en 1859 par le Français Gaston Planté, elle a été perfectionnée en 1881 par le Luxembourgeois Henri Owen Tudor, qui l'a rendue plus robuste et plus efficace en remplaçant les feuilles de plomb trempées dans l'acide sulfurique par des plaques de plomb recouvertes d'une pâte active. [3]

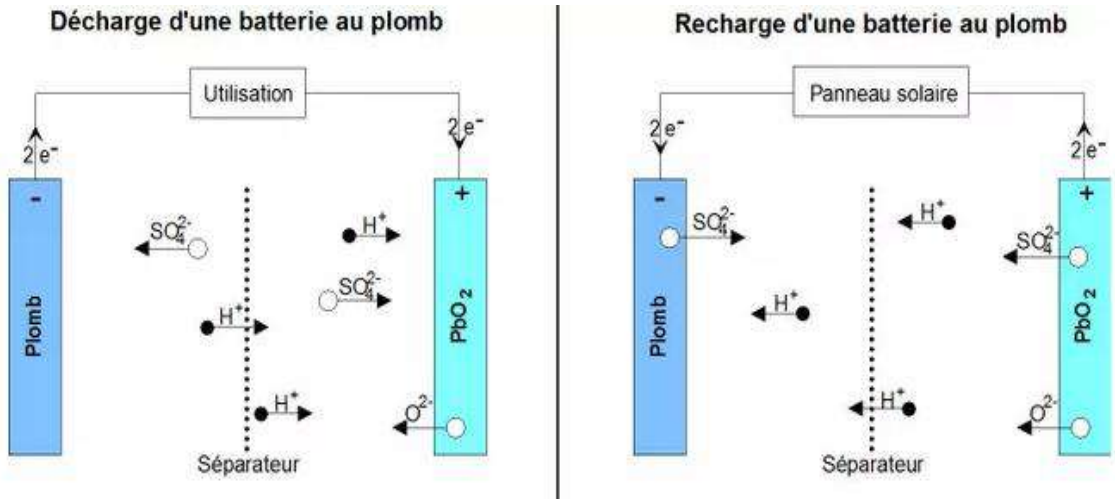


Figure I.3 : Charge et décharge de la batterie au plomb**.**

Lors de la charge, une batterie au plomb libère de l'oxygène et de l'hydrogène, et comme le boîtier n'est pas hermétique, la batterie doit être utilisée à fond et le niveau d'eau ajusté régulièrement. D'autre part, les vapeurs et/ou les éclaboussures d'acide sulfurique provoquent de la corrosion si l'emplacement de la batterie n'est pas entretenu (avec de l'eau et du bicarbonate de soude). Ce type de batterie ne supporte pas bien les décharges complètes et les surcharges ; elles sont conçues pour rester chargées en permanence. [3]

I.5.2. Batterie Nickel – Cadmium :

Il s'agit également d'une technologie très ancienne, inventée par le Suédois Waldemar Jungner en 1899. Elle était très répandue pour les appareils électriques nécessitant un courant important, tels que les téléphones portables ou les appareils photo numériques. Ce type de batterie a une durée de vie assez longue (environ 1 000 cycles). Cependant, le passage aux niveaux de puissance et aux dimensions de batteries requis pour la propulsion automobile pose des problèmes de fonctionnement et de fiabilité qui n'ont toujours pas été résolus à ce jour. [3]

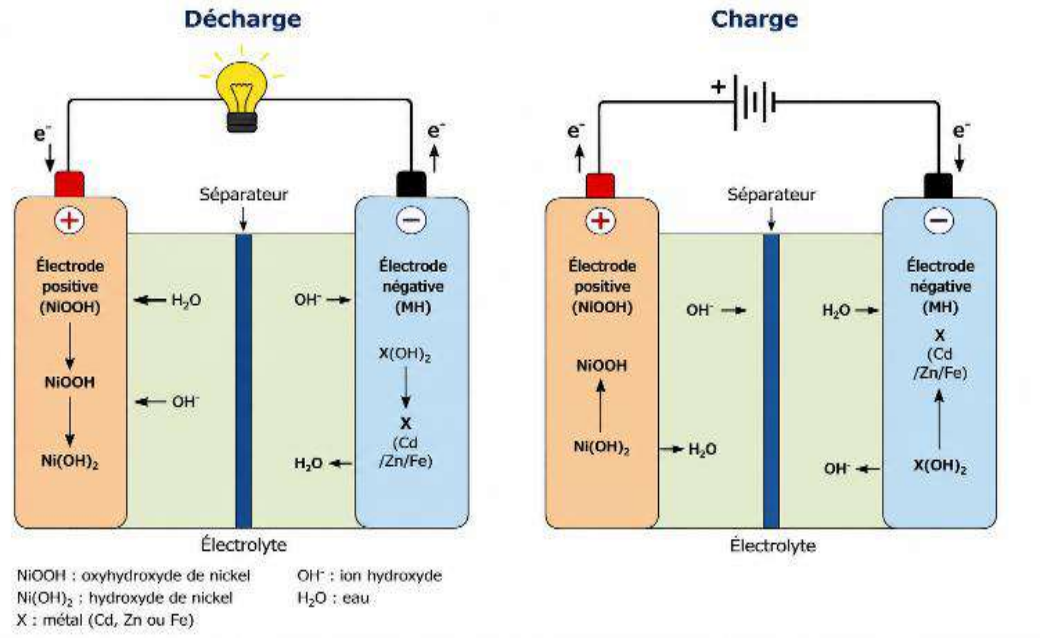


Figure I.4 : Charge et décharge des batteries nickel-cadmium.

I.5.3. La Batterie Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH)

C'est la technologie qui a succédé aux batteries Ni-Cd, commercialisée en 1990, Ces batteries ont une architecture similaire aux batteries Ni-Cd pour une densité énergétique doublée mais une résistance supérieure qui impose une phase de rodage des éléments pour débiter de forts taux de courants. C'est une technologie assez fragile car ne supportant pas la surcharge. Un avantage certain de cette technologie est qu'elle n'a pas d'effet mémoire mais a une capacité d'autodécharge importante. Ce type de batterie est

adapté pour une transition vers les voitures électriques mais sa durée de vie n'est pas satisfaisante. La technologie Ni-MH est la mieux adaptée pour les véhicules électriques grâce notamment à un coût financier qui est plus faible que les batteries Li-ion. [3]

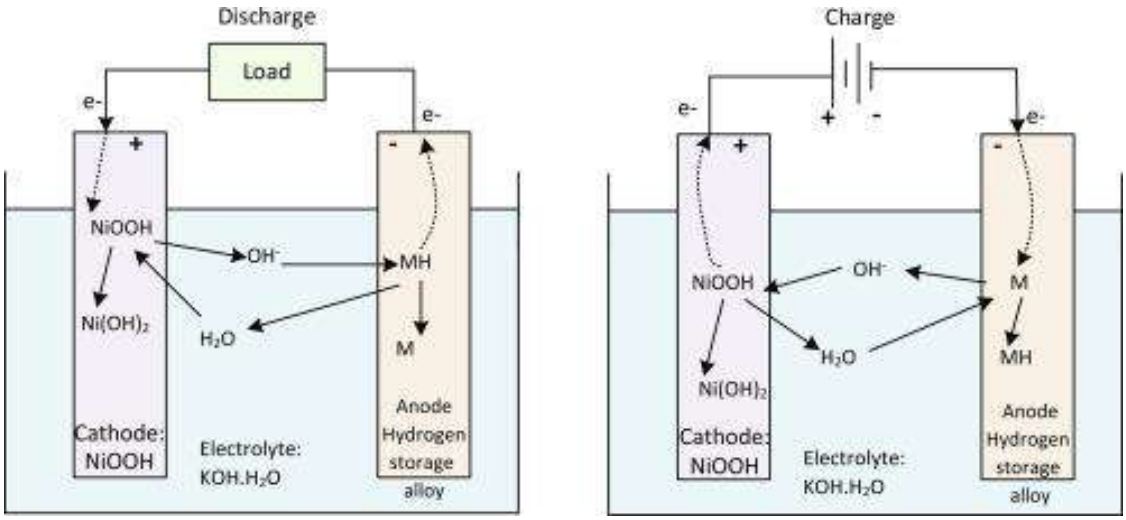


Figure I.5: Charge et décharge des batteries nickel-métal-hydrure

I.5.4. Batterie Lithium-ion (Li-ion)

L'électrolyte est constitué d'une solution organique ou d'un polymère solide. La grande légèreté de ce métal autorise l'obtention de densité énergétique extrêmement élevée et la tension de cellule, une densité de puissance importante. Leur coût est 10 fois plus élevé que le Pb (600€/ kWh) et ils ne sont encore utilisés couramment que pour les applications de petites puissances,[3].

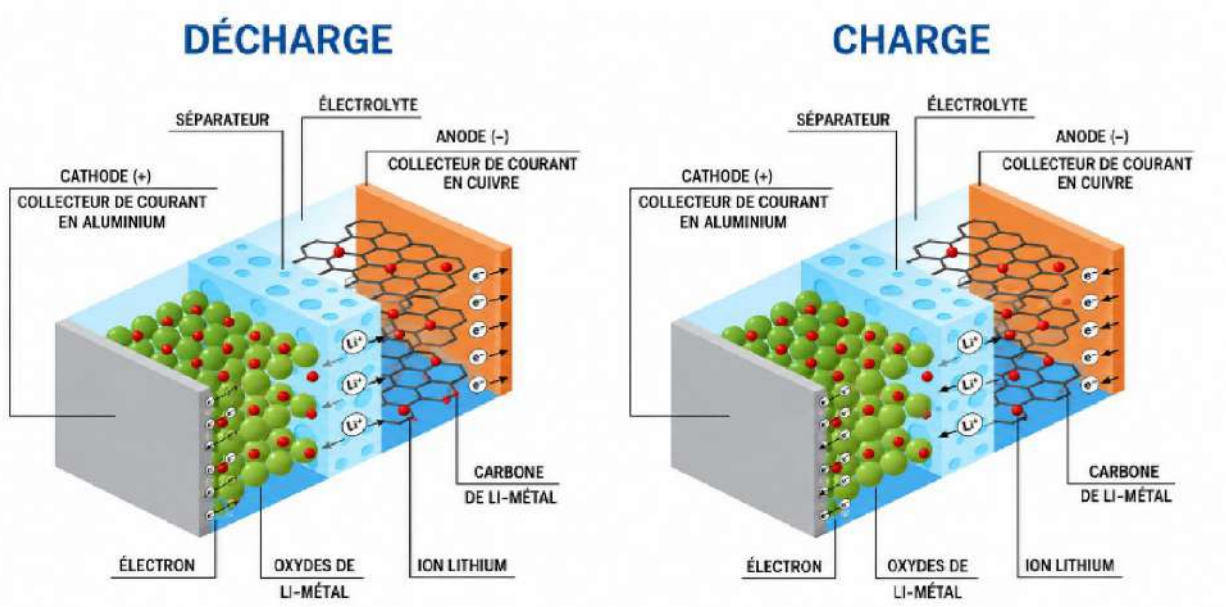


Figure I.6 : Charge et décharge d'une batterie lithium-ion,[3].

I.6. Comparaison entre les différents types de batteries

La constitution chimique d'une batterie fait la grande différence entre les différents types de batterie, la constitution chimique influe directement sur l'énergie qu'elle délivre, mais, les utilisateurs s'intéressent de beaucoup de caractéristiques, à savoir la durée de vie, le prix, le temps de charge, les tensions qu'ils développent … etc. Pour faire une comparaison correcte des entre les différents types de batteries, il nous faut une grande étude bibliographique, e plus le domaine de fabrication des batteries est en développement continu et un sujet de recherche en croissance. Dans ce mémoire on va donner un tableau récapitulatif pour comparer entre les différentes technologies et types de batteries présentés, dans cette comparaison on a utilisé plusieurs paramètres que nous jugeons importants.

Le tableau suivant montre les caractéristiques moyennes des différentes technologies de batterie utilisé pour stocker l'électricité produit, il est a noté que le couleur vert montre un point fort pour le type de batterie qui correspond, et le rouge, un point faible.

TAB I.1. Tableau comparatif des différents types de batterie

	Plomb	Nickel-Cadmium	Nickel-Métal hydrure	Lithium-Ion
Tension cellule	2,0V	1,2 V	1,2 V	3,6 à 3,7V
Energie spécifique	25-50 Wh/kg	30-60 Wh/kg	50-90 Wh/kg	150-250 Wh/kg
Cycles	200-500	1 000-1 500	1 000	2000-3 000
Domaine de température	0°C à 50°C	-30°C à 50°C	-20°C à 50°C	-20°C à 50°C
Autodécharge*	~5 %/mois	~15 %/mois	~25%/mois	~2 %/mois
Durée de vie calendaire	5 ans	10 ans	5-10 ans	5-15 ans
Prix kWh (Pb base 100)	100	300	350	300 à 350
Temps de charge standard	10 h	5 h	3-5 h	3h
Capacité Spécifique	20-35 mAh/g	50-80 mAh/g	80 mAh/g	150-250 mAh/kg

Les batteries au Lithium-Ion sont actuellement les plus performantes, comme le montre le Tableau, il est aisé de constater une supériorité pour la plupart des paramètres ; il offre la plus grande Energie Spécifique (150-250 Wh/kg) et la meilleur Capacité Spécifique (150-250mah/g). Les cellules au lithium-Ion offre la Tension la plus important (de 3.6 à 3.7 Volts). De plus, le cycle de

service ou de vie est le plus important ce qui rends ce type de batterie (à base de Lithium-Ion) le meilleur choix pour les applications moderne tels que les Smartphones et les Véhicule Electriques.

Il est important de noter que les paramètres donnés au tableau précédent représente une partie parmi beaucoup de caractéristiques, nous pouvons citez d'autres caractéristiques et paramètres dans la section suivante.

I.7. Caractéristique des batteries

Il existe plusieurs types de batteries, chacune ayant des caractéristiques spécifiques adaptées à di fférentes applications.et permet c'est caractéristique on a :

- ✓ **Tension de la batterie :** la tension électrique entre les bornes d'un élément ou d'une batterie pendant la décharge.
- ✓ **Tension en circuit ouvert :** la tension électrique aux bornes d'un élément ou d'une batterie quand le courant de décharge est nul**.**
- ✓ **Décharge** : opération pendant laquelle un accumulateur fournit du courant à un circuit extérieur par la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique**.**
- ✓ **Courant de décharge** : le courant débité par la batterie lors de la décharge.
- ✓ **Régime de charge :** courant électrique auquel on charge un accumulateur ou une batterie d'accumulateur. Cycle d'utilisation : ensemble d'une décharge et d'une charge ultérieure destinée à rétablir l'accumulateur dans son état initial.
- ✓ **Capacité de stockage** : quantité d'électricité (charge), généralement exprimée en ampère-heure (Ah), la quantité d'énergie qu'une batterie complètement chargée peut fournir dans des conditions spécifiées.
- ✓ **Profondeur de décharge** : la quantité de charge, en pourcentage de la capacité initiale, qui peut être retirée d'une batterie sans réduire sa durée de vie.
- ✓ **État de santé (SOH) :** le facteur entre la capacité de charge actuelle de la batterie et sa capacité de charge initiale. Lorsque le ratio est inférieur à 80 %, la batterie est considérée comme ayant atteint sa fin de vie.
- ✓ **Durée de vie :** durée totale de la vie active d'un élément ou d'une batterie en fonctionnement**.**
- ✓ **Température** : Température de l'électrolyte causant la réaction chimique.
- ✓ **État de charge (SOC) :** La quantité de charge, en pourcentage de la capacité initiale, qui reste accumulée dans la batterie, [1].

I.8. Structures, liaisons et architecture de batterie

I.8.1. Structure de batterie

Les technologies batteries actuelles se présentent sous différents formats de cellule. Pour une application donnée, cela influence directement le packaging global du système de stockage d'énergie en raison des propriétés mécaniques, de la masse résultante et de la gestion thermique liées à ce format. Donc, le format de la cellule aura une influence sur la durée de vie de la batterie.

Il existe plusieurs formats des cellules : cylindrique, prismatique, poche (Cylindrical, Prismatic et Pouch) la figure I.7 montre un exemple de chaque format de cellules lithium de capacité importante, exception faite du format pile bouton généralement réservé aux applications très basse puissance (montres, pacemakers, appareillage auditif,).

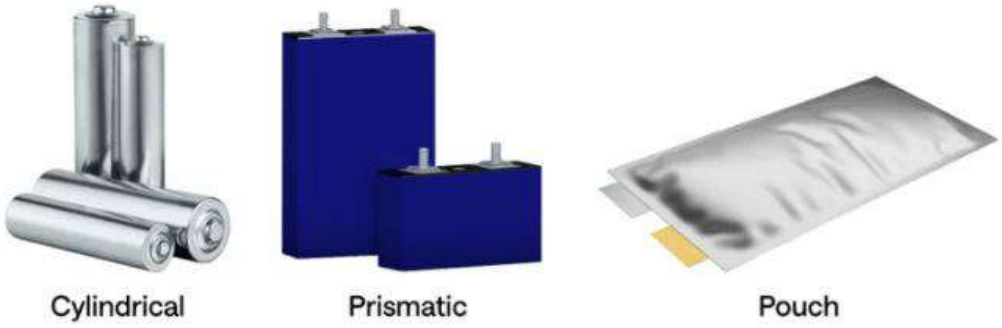


Figure I.7. Différents formats de cellules (cylindrique, prismatique et poche), [1].

I.8.2. Liaisons des batteries

Pour obtenir la tension et le courant ou capacité requise qui sont appropriées pour une application demandée, on peut généralement connecter les cellules de la batterie soit en série soit en parallèle.

a) Connexion en série

La connexion des batteries en série « plus » à « moins » (positif d'une cellule à négatif de la cellule suivante) nous permet d'obtenir une tension qui atteindre une valeur appropriée pour l'application demandée et le courant qui traverse les cellules est le même.

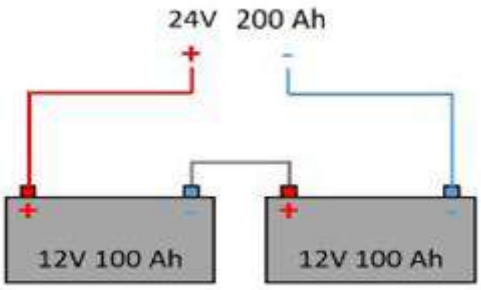


Figure I.8 : Liaison en série des batteries.

b) Connexion en parallèle

Si deux ou plusieurs batteries sont connectées « plus » à « plus » et « moins » à « moins » (positif d'une cellule à la borne positive de l'autre et de même pour les pôles négatifs) alors elles sont dites "connectées en parallèle". Deux piles reliées en parallèle produiraient la même tension que d'une seule cellule, mais elles sont capables de délivrer deux fois le courant. Elles auraient aussi deux fois la capacité de stockage d'une seule cellule à la même tension, [2].

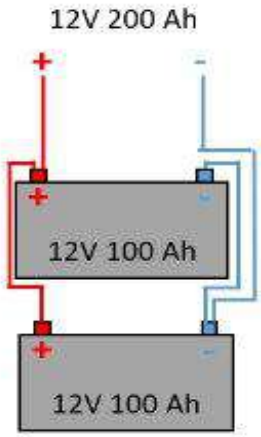


Figure I.9. Liaison en parallèle des batteries, [4]

I.8.3. Architecture interne des batteries

L'hypothèse d'équilibrage des cellules est importante, car cela signifie que chaque cellule présente les mêmes caractéristiques (même état de charge et mêmes courbes de décharge). Le pack ne présente pas de dispersion et toutes les cellules ont vieilli de la même façon. L'état de charge (SOC) d'une cellule coïncide alors avec l'état de charge du pack [3].

Le modèle de pack se construit ainsi aisément à partir du modèle de cellule. La figure suivante montre le passage de la cellule à un pack de batterie.

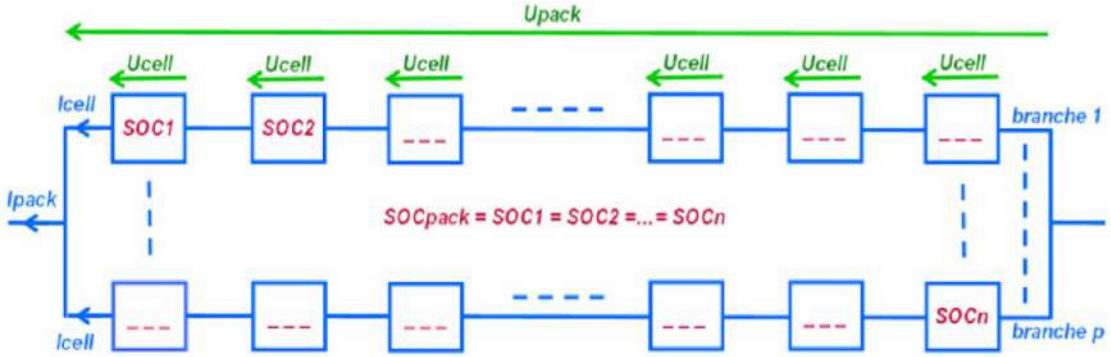


Figure I.10. La tension d'une cellule au pack batterie, [3].

Donc d'après la figure précédente, on peut déduire l'expression de la tension et du courant de sortie de batterie si nous connaissons la structure (série et parallèle des cellules et des branches), on peut écrire :

$$I_{bat} = \sum_{i=1}^{p} I_{cel} = p.I_{cel} \qquad (I.1)$$

$$V_{bat} = \sum_{i=1}^{m} V_{cel} = m.V_{cel} \qquad (I.2)$$

$$SOC_{bat} = SOC_{1....n} \qquad (I.3)$$

Avec :

$I_{bat} = I_{pac}$: Le courant d'un pack (batterie).

$V_{bat} = V_{pac}$: La tension d'un pack (batterie).

p : Nombre de branches

m : Nombre de cellules par branche

$n = m.p$: Nombre total de cellules.

I.9. Etude de la batterie au Lithium-ion

Une batterie Lithium-ion est une batterie rechargeable qui utilise le Lithium comme matériau actif dans ses électrodes. Cette technologie de batterie est largement utilisée dans de nombreuses applications électroniques, telles que les téléphones portables, les ordinateurs portables, les véhicules électriques, etc. Les batteries Lithium-ion sont appréciées pour leur légèreté, leur densité énergétique élevée et leur capacité à se recharger rapidement, [5].

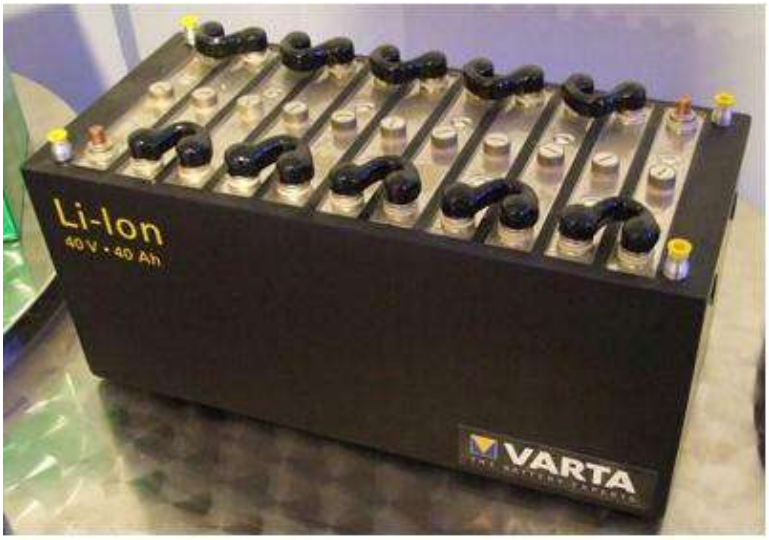


Figure I.11: Une batterie au Lithium (Li-ion), Tension 40V, Capacité Nominale 40Ah, Constitué de 11 Cellules montés en série.

I.9.1. Principe de fonctionnement

De manière générale, un accumulateur est composé d'une électrode positive (ou cathode en convention générateur), d'une électrode négative (ou anode en convention générateur), d'un séparateur et d'un électrolyte dans lequel sont immergés l'électrode positive, l'électrode négative et le séparateur.

Le principe de fonctionnement de la batterie est basé sur l'utilisation de deux paires redox, Ox1/Red1 et Ox2/Red2, qui se produisent respectivement à deux électrodes différentes. La Figure I.11 résume le principe de fonctionnement des accumulateurs sous la forme d'un schéma simplifié, [6].

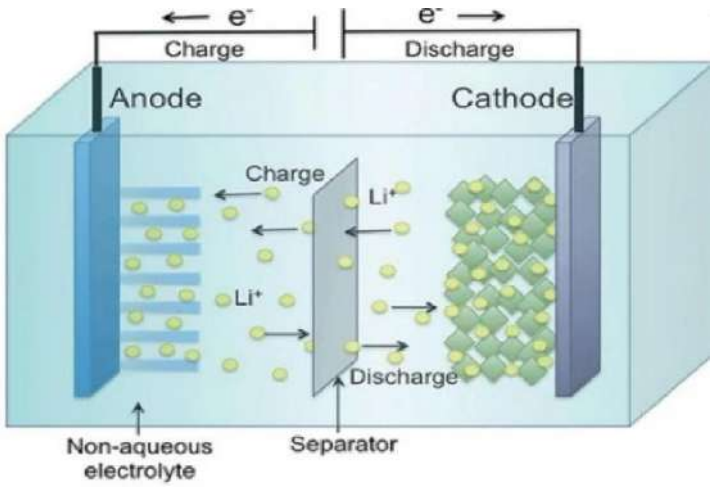


Figure I.12 : Principe de fonctionnement de la batterie lithium-ion, [1].

I.9.2. Avantages et inconvénients des batteries Lithium-ion

a) Avantages des batteries Li-ion

Haute densité d'énergie : Les batteries Lithium-ion offrent une densité d'énergie élevée, ce qui signifie qu'elles peuvent stocker plus d'énergie par unité de poids ou de volume par rapport aux autres types de batteries.

Longue durée de vie : Les batteries Lithium-ion peuvent durer plus longtemps que les autres types de batteries. Les performances de la batterie ne diminuent pas aussi rapidement que les autres types de batteries, et elles ont une durée de vie plus longue dans des conditions normales.

Recharge rapide : Les batteries Lithium-ion peuvent être rechargées plus rapidement que les autres batteries.

Sans effet mémoire : Les batteries Lithium-ion n'ont pas d'effet mémoire. Cela signifie qu'elles ne perdent pas leur capacité de stockage d'énergie lorsque vous les rechargez avant qu'elles soient complètement déchargées.

b) Inconvénients des batteries Lithium-ion

Coût élevé : Les batteries Lithium-ion sont plus chères à produire que les autres types de batteries.

Risque d'explosion : Les batteries Lithium-ion peuvent exploser ou prendre feu si elles sont endommagées ou surchargées.

Sensibles à la charge et à la température : Les batteries Lithium-ion peuvent être endommagées si elles sont exposées à des températures élevées ou basses ou si elles sont surchargées ou sous-chargées.

Difficulté de recyclage : Le recyclage des batteries Lithium-ion est plus difficile que celui des autres batteries en raison de leur composition chimique complexe.

I.10. Modélisation de la batterie lithium-ion

Dans notre étude, la batterie est modélisée comme un générateur de tension parfait, elle est constituée d'un grand nombre de cellules et pour la modélisation d'une cellule on a deux termes principaux :

- L'état de charge d'une cellule de batterie (SOC).
- Et la tension qui fournit par une cellule (V_{cel}).

I.10.1. Etat de charge d'une cellule de la batterie (SOC)

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

$$SOC(t) = SOC(t_0) - 100.\frac{C_N(t)}{C_{N0}} \tag{I.4}$$

$$C_N(t) = \frac{1}{3600}.\int_{t_0}^{t} I_{cel}(t).dt \tag{I.5}$$

Avec :

$C_N(t)$: la capacité actuelle de la cellule.

C_{N0} : la capacité initiale.

$SOC(t)$: l'état de charge actuel de la cellule.

$SOC(t_0)$: l'état de charge initial.

$I_{cell}(t)$: le courant traversant la cellule.

I.10.2. La tension fournie par une cellule :

La tension d'une cellule dépend du type de technologie utilisé (type de batterie) ; elle peut être variable en fonction de l'état de charge $SOC(t)$ et en fonction de la densité massique des cellules. Dans la littérature, on peut trouver plusieurs courbes qui donnent cette relation de la tension d'une cellule en fonction d de l'état de charge de la batterie $SOC(t)$ et de la température T°, elle est nommée OCV (cartographie de tension à vide aux bornes d'une cellule), on peut représenter cette caractéristique par la figure (I.13).

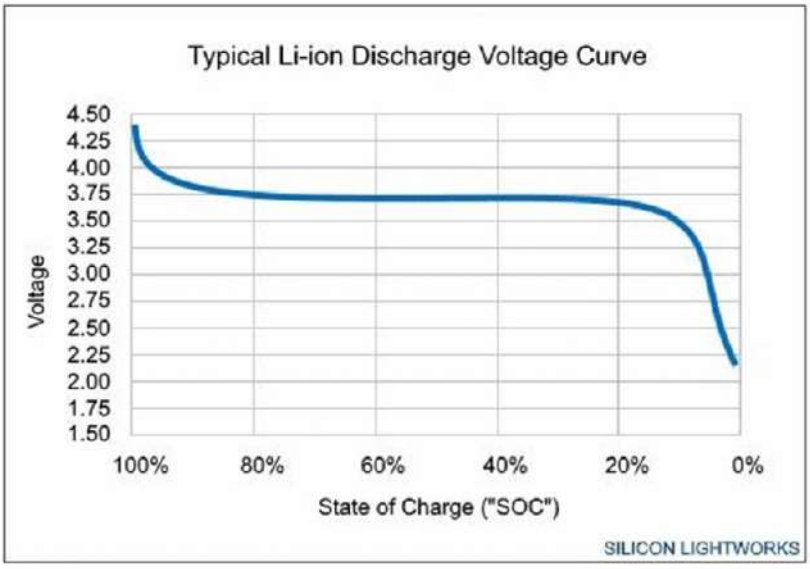


Figure I.13 : La tension à vide (OCV) aux bornes d'une cellule (Li-ion) en fonction du SOC.

Pour continuer la modélisation de la batterie, on peut écrire la formule suivante :

$$V_{cel} = V_{cel}(SOC) - V_{per} \tag{I.6}$$

avec :

V_{cel} : la tension d'une cellule.

$V_{cel}(SOC)$: la tension fournie par une cellule en fonction de SOC.

V_{per} : la tension des pertes internes d'une cellule.

La tension V_{per} dépends de la résistance interne de la cellule R_{int} et du courant I_{cel}, cette dernière varie, à son tour, en fonction de l'état de charge $SOC(t)$ et de température T°. La résistance interne d'une cellule (nommée DCR) peut être donnée par la figure suivante :

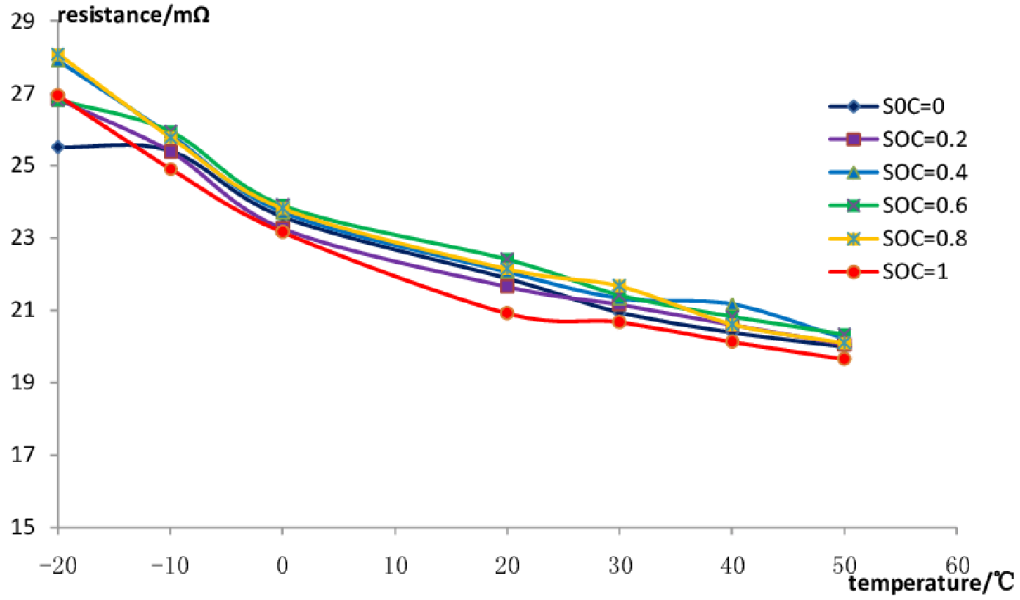


Figure I.14. La résistance interne (DCR) d'une cellule (Li-ion) en fonction du SOC et la T°.

Il est a noté que l'état de charge SOC d'une cellule est le même que l'état de charge d'une batterie, parce que les cellules sont identiques, ils se chargent et se décharge en même temps que la batterie, il en résulte que l'équation I.6 en tenant compte de l'équation I.2 devient :

$$V_{batl} = V_{bat}(SOC) - V_{per} \tag{I.7}$$

I.10.3. Modèle statique d'une batterie

Le modèle le plus simple des modèles de batterie est le modèle statique (E_0, R_{int}), parce que c'est un modèle à paramètres constants.

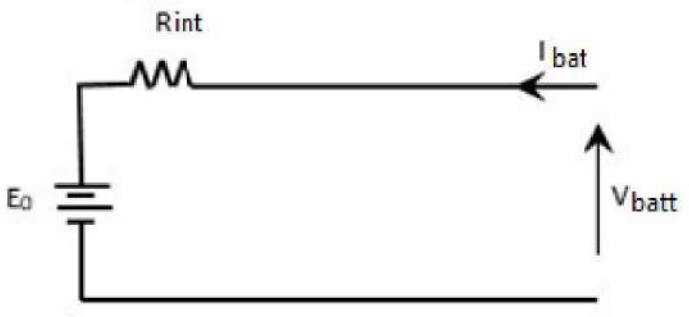


Figure I.15: Modèle de batterie (E_0, R)

On a l'équation suivante :

$$V_{Batt} = E_0 - R_{int} I_{bat} \tag{I.8}$$

Avec :

R_{int} : Résistance interne de la batterie

E_0 : F.é.m. à vide (force électromotrice ou OCV)

La variation de tension en fonction du courant prélevé à la batterie I est ainsi modélisée. La valeur du paramètre R_{int} est une donnée connue du constructeur. Elle peut également être déduite de courbes de tension issues d'essais (de même que le paramètre E_0). Le paramètre E_0 étant constant, l'état de charge de la batterie ne varie pas. Ce modèle à quantité d'énergie infinie ne convient donc pas à une étude d'autonomie.

I.10.4. Modèles dynamiques d'une batterie

L'ajout d'un élément capacitif introduit une dynamique dans le modèle (Figure I.16).

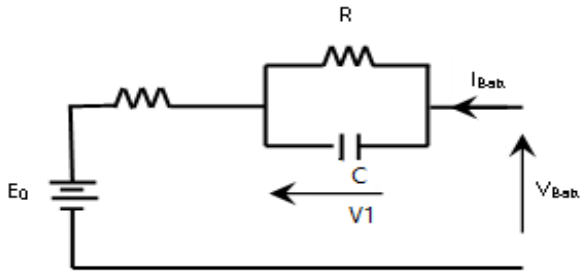


Figure I.16: Modèle de batterie (E_0, R, C)

Dans ce modèle on introduire l'équation suivant :

$$V_{Batt} = E_0 - \frac{R}{R.C.p+1}.I_{Batt} \quad \text{(I.9)}$$

Les valeurs des paramètres E_0, R et C sont calculées à partir de données d'essais (ou de courbes constructeur).

I.10.5. Modèle de Thévenin du premier ordre

La version la plus élémentaire du modèle de Thévenin, souvent dénommée premier ordre, se compose d'une tension source VOC, d'une résistance interne R_{int} et d'un couple RC qui illustre l'effet capacitif entre deux plaques parallèles ainsi que la résistance de contact.

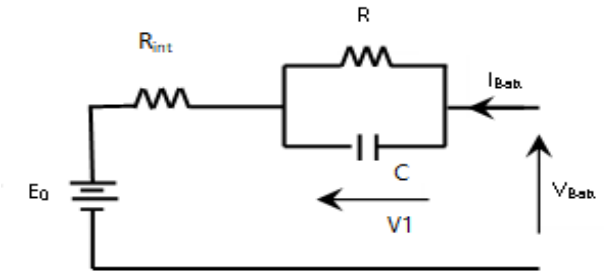


Figure 1.17 : Modèle Thévenin (premier ordre)

Dans ce modèle on introduire l'équation suivant :

$$V_{Batt} = E_0 - RI_{Batt} - V_1 \quad \text{(I.10)}$$

L'ajout d'une paire RC au modèle linéaire simple a pour objectif de représenter les phénomènes transitoires. Le principal inconvénient du modèle de Thévenin est que tous les paramètres sont considérés comme constants. Ou, on sait que les paramètres dépendent du SOC.

I.10.6. Modèle de Thévenin du deuxième ordre

Le modèle du deuxième ordre, à deux constantes de temps, ou modèle à double polarisation, ajoute une deuxième paire RC, avec une constante de temps plus grande au modèle précédent. Il est ainsi possible de représenter avec précision la tension aux bornes lorsque le courant est nul.

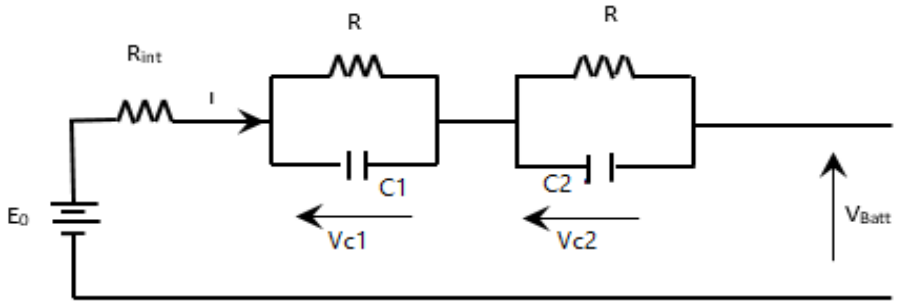


Figure 1.18. Modèle de Thévenin (deuxième ordre)

Ainsi, la première paire RC a une constante de temps faible pour décrire les effets transitoires à court terme, alors que la deuxième paire RC a une constante de temps plus importante pour décrire les effets transitoires à long terme.

$$V_{batt} = E_0 - R_{int} \cdot I_{bat} - Vc1 - Vc2 \tag{I.11}$$

Dans ce modèle, R_{int} est divisé en deux éléments, la résistance d'origine R séries et la résistance $R_{cycling}$, qui tient compte du cycle de la cellule. Tous les paramètres sont définis en tenant compte du SOC et de la température.

Le modèle en espace d'états qui décrit la dynamique du système est donné par :

$$\begin{aligned}
\dot{x}1 &= \frac{1}{R_1(t)C_1(t)}x1 + \frac{1}{C_1(t)}U \\
\dot{x}2 &= \frac{1}{R_2(t)C_2(t)}x1 + \frac{1}{C_2(t)}U \\
\dot{x}3 &= \frac{\eta}{C_{batt}(t)}U \\
y &= Voc - x_1 - x_2 - R_{batt}(t)U
\end{aligned} \tag{I.12}$$

Où $x_1 = V_1$, $x_2 = V_2$, $x_3 = SOC$, $U = I_{bat}$, η est l'efficacité de la batterie et y est la tension de sortie de la batterie. $R_{batt}(t)$, $R_1(t)$, Cs(t), $R_2(t)$ et $C_2(t)$ sont des paramètres variables et dépendent de la température (T) et de l'état de charge (SOC). De plus, les valeurs de ces paramètres diffèrent entre la charge et la décharge, ainsi le comportement de la tension de la cellule sera décrit par deux ensembles de paramètres.

I.11. Étude de simulation sous MATLAB/Simulink

Après avoir présenté les différents types de batteries, leurs principes de fonctionnement ainsi que les différents modèles de batteries lithium-ion, nous avons décidé d'effectuer une étude de

simulation sous MATLAB/Simulink afin d'analyser le comportement de la batterie et de comparer les différents modèles proposés dans la littérature.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la validité des modèles utilisés et de mettre en évidence leurs performances à travers l'analyse de plusieurs paramètres caractéristiques tels que la tension de la cellule, le courant, l'état de charge ainsi que la capacité de la batterie.

Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus après simulation d'une batterie lithium-ion sous MATLAB/Simulink. Les caractéristiques de la batterie et de ses cellules utilisées dans la simulation sont représentées dans le tableau suivant.

TAB I.2. Caractéristiques de la Batterie utilisée

Paramètre de batterie	Valeurs
Tenions nominale (V)	50
Capacité nominale (Ah)	200
Capacité d'une cellule (Ah)	1.44
Tension à vide d'une cellule (V)	3.6
Tension max de charge d'une cellule (V)	4.2
Nombre de cellule en série	14
Nombre de branche	10

Pour assurer un rapprochement maximal aux conditions de fonctionnement réel des batteries et, nous supposons que la température de la batterie évolue selon la courbe donnée sur la figure suivante, où, elle commence à augmenter à l'instant t_0 et commence à partir de la température ambiante (nous supposons 20°C) jusqu'à atteindre une température maximale de 55°C.

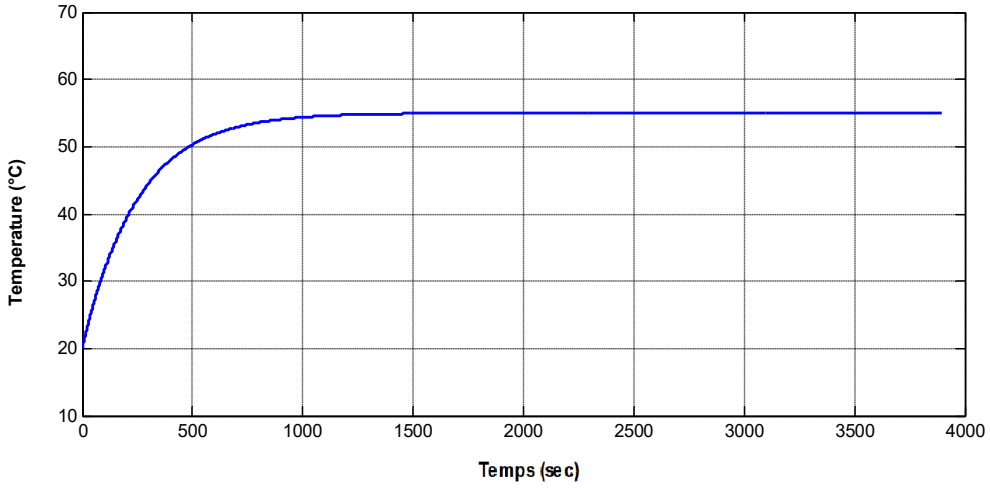


Figure I.19 : Évolution de la température en fonction du temps pendant la simulation.

Les résultats obtenus, en utilisant les modèles mathématiques présentés au-dessus, en utilisant la batterie dont les paramètres sont donnés avec le Tableau I.2, les résultats de simulation sont représentés sur les figures I.20, où, les sous figures illustrent l'évolution de la tension de la cellule (V_{cell}), du courant de la cellule (I_{cell}), de l'état de charge (SOC) ainsi que de la capacité actuelle d'une cellule de la batterie ; tous ces variables sont donnés en utilisant chacun des quatre modèles étudiés afin de voir la différence entre eux.

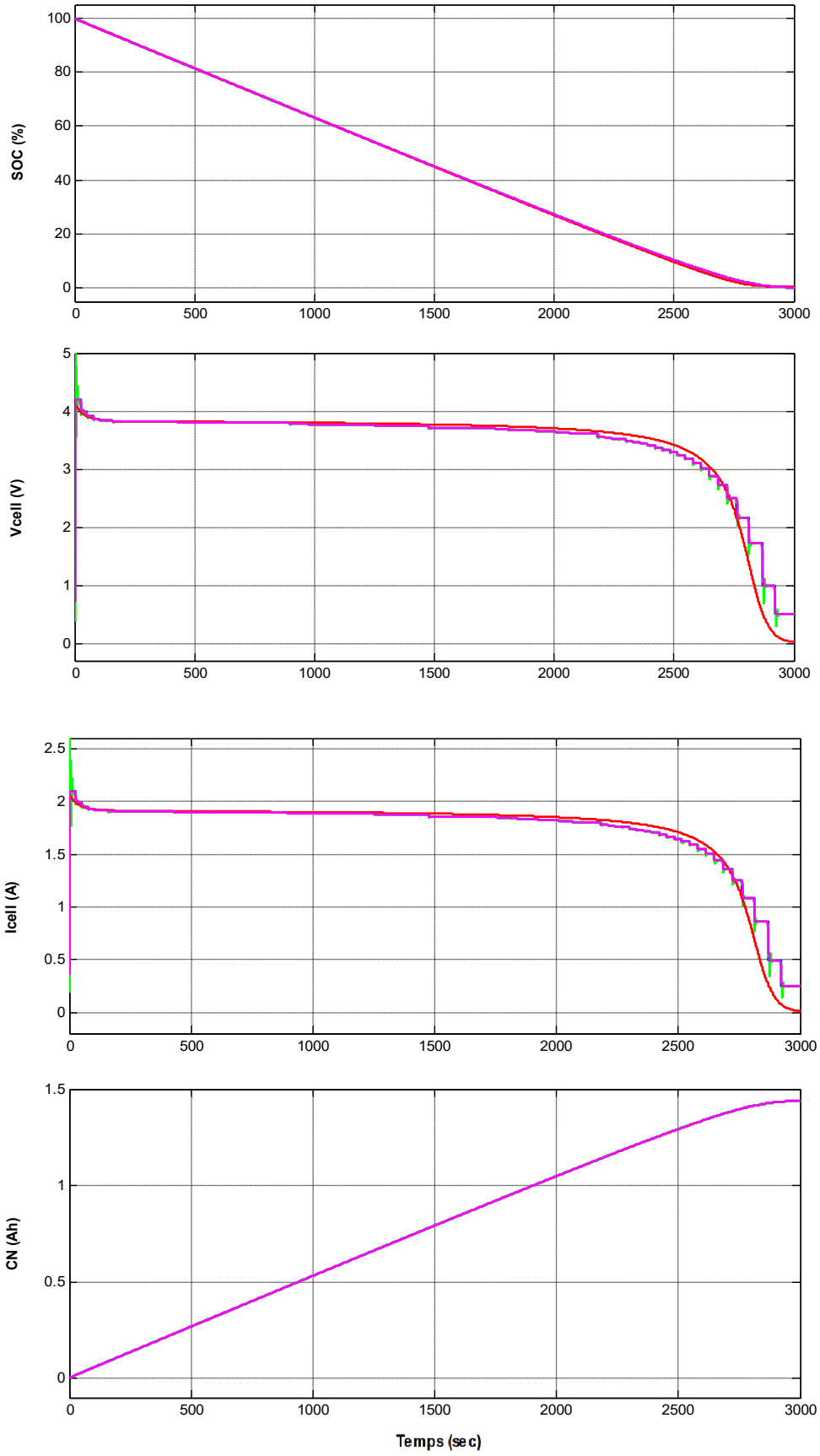


Figure I.20. Variables d'une Cellule de batterie obtenue en utilisant les différents modèles.

À partir des résultats de simulation obtenus, nous constatons que les quatre modèles présentent un comportement très proche. Les différentes courbes obtenues montrent une bonne concordance entre les modèles, ce qui confirme leur capacité à représenter correctement le comportement général de la batterie lithium-ion.

Pour l'état de charge (SOC), les courbes sont pratiquement superposées durant toute la durée de la simulation. Le SOC diminue progressivement avec le temps en raison de la décharge de la batterie. Cette évolution est cohérente avec le fonctionnement réel d'une batterie lithium-ion. L'absence de différences significatives entre les modèles indique que tous les modèles permettent une estimation correcte de l'énergie restante dans la batterie.

Concernant la tension de la cellule (V_{cell}), on observe que celle-ci débute avec une valeur proche de 4,2 V correspondant à l'état de charge maximal de la batterie. Au fur et à mesure de la décharge, la tension diminue progressivement pour atteindre une valeur voisine de 3,6 V, qui correspond à la tension nominale de fonctionnement de la cellule. Les courbes obtenues sont presque identiques pour les différents modèles. Toutefois, une légère différence apparaît au niveau des premières secondes de simulation, correspondant au régime transitoire.

L'analyse du courant de la cellule (I_{cell}) montre également une forte similitude entre les différents modèles. Les courbes suivent pratiquement la même évolution, ce qui traduit la stabilité du comportement électrique de la batterie dans les conditions de simulation considérées. Les écarts observés restent négligeables et n'affectent pas les performances globales du système.

Pour la capacité de la batterie, les résultats montrent une diminution progressive au cours du temps, traduisant la consommation continue de l'énergie stockée. Les quatre modèles fournissent des résultats très proches, ce qui confirme la cohérence des simulations réalisées.

Les écarts entre les différents modèles restent très faibles et apparaissent essentiellement durant le régime transitoire. Globalement, les quatre modèles présentent un comportement similaire et donnent des résultats proches.

Afin de mieux mettre en évidence et voir les différences entre les différents modèles présentés dans la section I.10, nous avons représenté encore une fois les courbes précédentes sous une forme agrandie (zoom), voir la figure suivante :

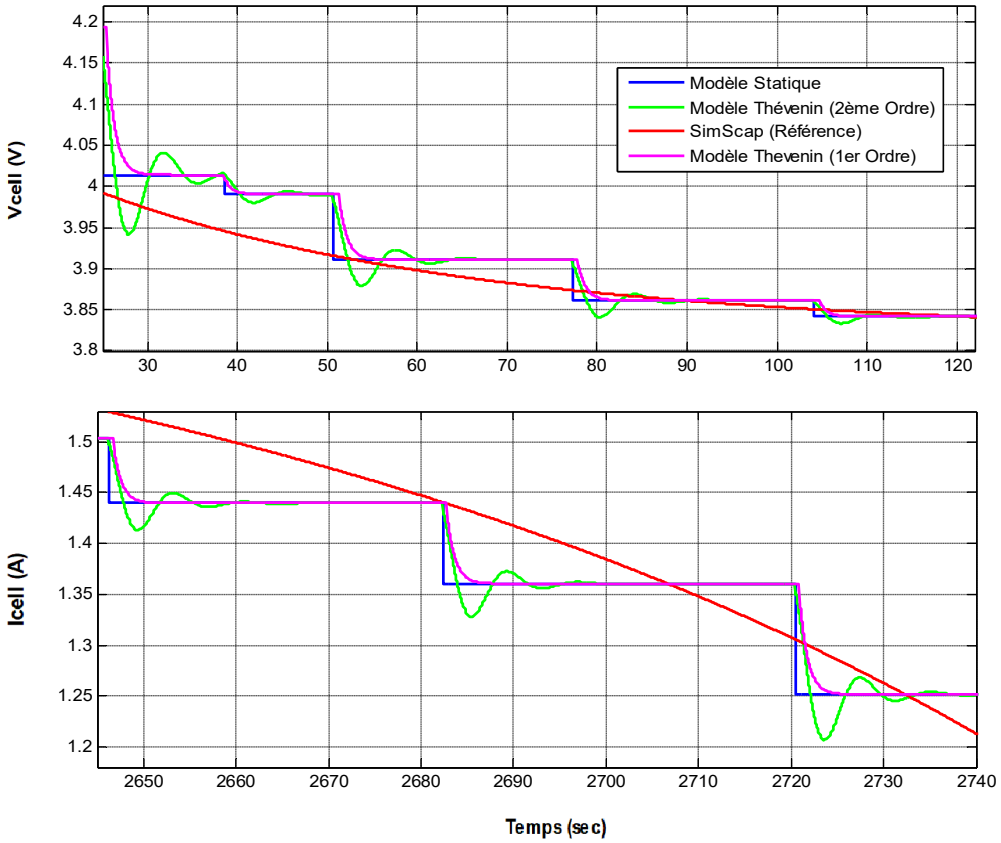


Figure I.21. Zoom pour voir les réponses transitoires des différents modèles.

Les résultats montrent que les écarts entre les modèles apparaissent principalement durant les phases transitoires. Le modèle Thévenin du deuxième ordre présente des variations plus importantes au début de chaque changement de régime, tandis que les autres modèles restent plus proches les uns des autres. Ici, il faut dire que le modèle Thévenin du deuxième ordre peut donner des résultats meilleurs, comme celle du modèle du premier ordre, nous n'avons optimiser les paramètre R et C ; avec un bon choix nous pouvons avoir des régime transitoire similaire voir meilleur que celle du modèle du premier ordre en imposant un bon coefficient d'amortissement.

Cependant, après une courte période de stabilisation, les différentes courbes convergent vers des valeurs très proches. Cela montre que malgré quelques différences durant les régimes transitoires, les quatre modèles reproduisent globalement le même comportement de la batterie. Ces résultats confirment la validité des modèles utilisés pour représenter la dynamique de la batterie lithium-ion.

Une deuxième série de simulations a été réalisée en faisant varier la valeur de la résistance de charge *R* afin d'étudier son influence sur le comportement et l'allure de chaque variable de la batterie et également sur les différents modèles utilisés.

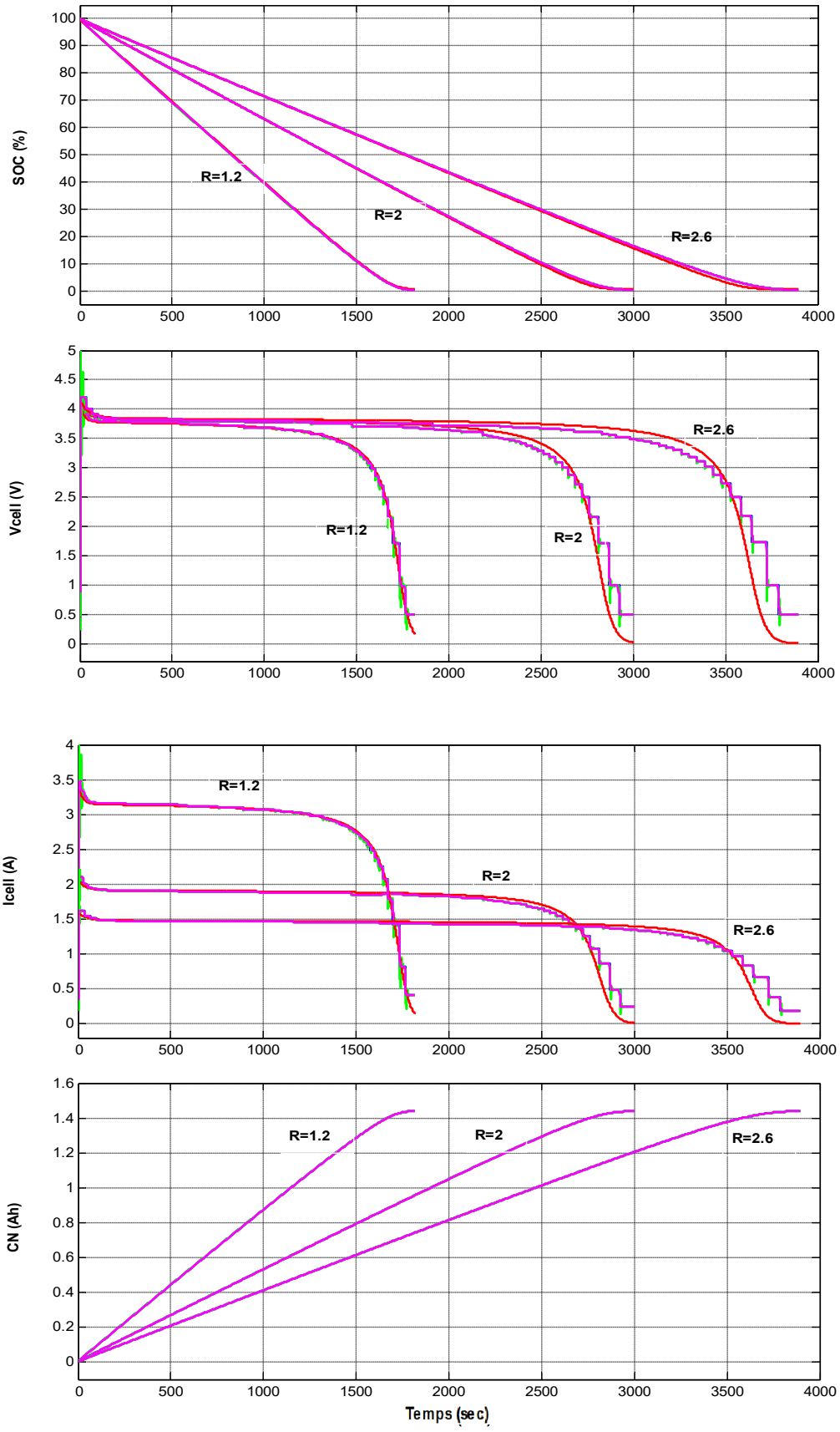


Figure I.22. Influence de la résistance de charge sur les performances de la batterie lithium-ion.

Les résultats obtenus montrent clairement l'influence de la résistance de charge sur le comportement de la batterie lithium-ion. Concernant l'état de charge (SOC), on remarque que la diminution du SOC est plus rapide lorsque la résistance de charge est faible (R = 1.2 Ω). Cela s'explique par le fait qu'une faible résistance entraîne un courant de décharge plus élevé, ce qui accélère la consommation de l'énergie stockée dans la batterie. À l'inverse, pour une résistance plus élevée (R = 2.6 Ω), la décharge est plus lente et le SOC diminue progressivement.

L'évolution de la tension de la cellule (V_{cell}) montre également une influence importante de la résistance de charge. Pour les faibles valeurs de résistance, la tension chute plus rapidement en raison du courant plus important traversant la batterie. En revanche, lorsque la résistance augmente, la tension reste plus stable durant une période plus longue.

Les courbes du courant (I_{cell}) confirment ces observations. Pour R = 1.2 Ω, le courant atteint les valeurs les plus élevées, tandis qu'il diminue progressivement lorsque la résistance augmente. Ce comportement est conforme à la loi d'Ohm puisque le courant est inversement proportionnel à la résistance de charge.

Concernant la capacité disponible (CN), les résultats indiquent qu'elle diminue plus rapidement pour les faibles résistances en raison du taux de décharge plus important. Pour les résistances élevées, la consommation de la capacité est plus progressive, ce qui permet d'augmenter l'autonomie de fonctionnement de la batterie.

D'une manière générale, cette étude montre que la résistance de charge influence directement les performances de la batterie. Une faible résistance permet de fournir davantage de courant mais réduit l'autonomie, tandis qu'une résistance plus élevée limite le courant débité et prolonge la durée de fonctionnement de la batterie.

Tous les résultats et variables représentés précédemment concerne une cellule de batterie, pour passer aux variables de batterie il suffit de tenir compte des équations de passage données par les équations I.1 et I.2 ainsi que le tableau I.2. Comme il est possible de tracer ces variables en fonction de la capacité actuelle CN, en fonction du temps ou bien en fonction du SOC, c'est ce que nous avons remarqué sur la majorité des documents.

La figure suivante montre l'évolution de la tension de batterie (Vbat), du courant de la batterie (Ibat), de l'état de charge (SOC) de la batterie qui est le même que celle de la cellule. Il reste de noter que les résultats sont obtenus dans les mêmes conditions des teste précédentes, ou bien nous pouvons dire que c'est le même test.

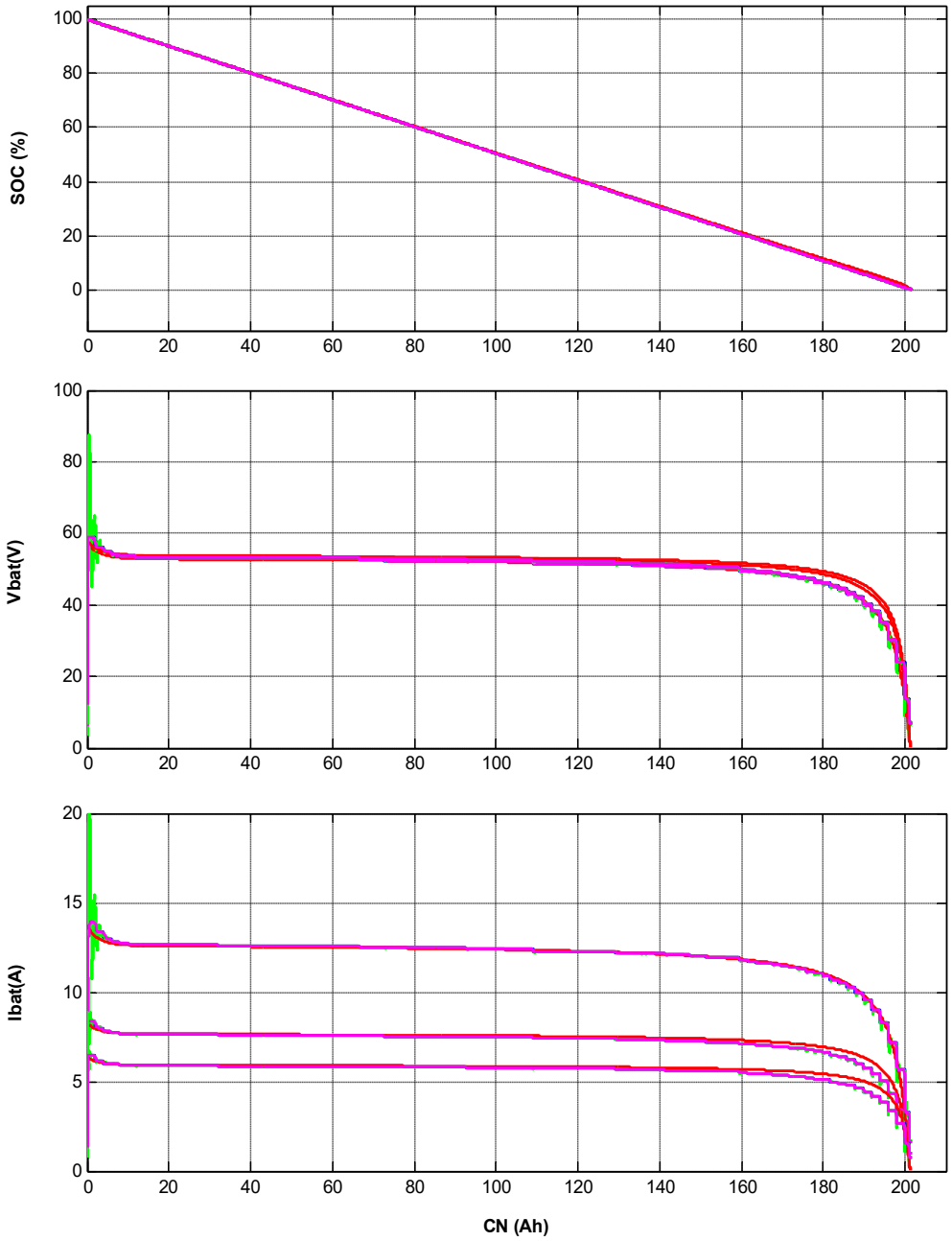


Figure I.23. Variables de la batterie lithium-ion durant le processus de décharge.

L'évolution du SOC montre une diminution progressive de 100 % vers 0 % avec l'augmentation de la capacité consommée. Cette décroissance régulière traduit l'utilisation progressive de l'énergie stockée dans la batterie pour alimenter la charge. L'absence de variations brusques confirme la stabilité du fonctionnement du système durant toute la phase de décharge.

Concernant la tension de la batterie V_{batt}, on observe qu'elle se stabilise autour de sa valeur nominale pendant une grande partie du cycle de fonctionnement. Cette caractéristique est typique

des batteries lithium-ion, qui sont capables de maintenir une tension relativement constante malgré la diminution progressive de l'énergie stockée. En fin de décharge, la tension chute rapidement, indiquant l'approche de la limite de fonctionnement de la batterie et l'épuisement de la capacité disponible.

Les courbes du courant I_{batt} montrent que la batterie est capable de fournir différents niveaux de courant tout en conservant un comportement stable. Durant la majeure partie du fonctionnement, le courant reste pratiquement constant, ce qui traduit la capacité de la batterie à répondre efficacement aux besoins de la charge. Lorsque la batterie atteint les faibles niveaux de SOC, une diminution du courant apparaît, accompagnant la chute de tension observée précédemment.

L'analyse globale des résultats montre que l'assemblage des cellules en série et en parallèle permet d'obtenir une batterie capable de fournir simultanément une tension élevée, une capacité énergétique importante et un courant adapté aux besoins de l'application. Les résultats obtenus confirment ainsi le bon comportement du modèle développé sous MATLAB/Simulink et mettent en évidence les performances de la batterie lithium-ion complète durant toute la phase de décharge.

I.12. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une étude de présentation, structure, types, fonctionnement, architecture et surtout de modélisation des batteries au Lithium-ion qui ont un avenir prometteur pour l'électrification des systèmes électriques, information, industriel, domestique, de communication et de transport (véhicules électriques) … de plus en plus grandissants. Dans ce contexte énergétique, les systèmes de stockage sont développés dans l'optique d'améliorer leurs conditions et performances d'utilisation, leur durée de vie et leur sécurité de fonctionnement. Cette amélioration n'est possible qu'en ayant une bonne maîtrise des différents paramètres de système. Ce travail se concentre, comme présenté, sur la caractérisation et la modélisation d'une batterie Lithium-ion, nous avons vue qu'ils existent plusieurs modèles, mais sont plus proche l'un à l'autre, ils présentent presque le même comportement, cela nous permet de continuer notre travail en utilisant n'importe quel modèle.

Dans la suite de ce travail, on va étudier les systèmes dédier au fonctionnement en mode charge et décharge des batteries, surtout l'étude des convertisseurs bidirectionnel DC-DC.

Chapitre II

Etude des convertisseurs Bidirectionnels et Association avec Batterie

II.1. Introduction

L'Electronique de Puissance a pour vocation de maîtriser le transfert d'énergie entre une source d'énergie et un récepteur que ce soit statique ou dynamique, que ce soit charge, réseaux ou batterie, en assurant une conversion à haut rendement. Pour cela, des semi-conducteurs sont utilisés en interrupteurs, et associés à des composants passifs pour former des convertisseurs statiques.

L'élément clé de la conversion est l'interrupteur statique qui va permettre, en interrompant ou non le transfert d'énergie entre les divers éléments du circuit, de gérer les valeurs moyennes des courants et des tensions, [7].

Dans un convertisseur, le choix d'un type de composant est basé sur sa commandabilité à l'ouverture et à la fermeture, en tension ou en courant, et surtout à sa réversibilité. La réversibilité en tension est l'aptitude à supporter des tensions directes et inverses à l'état bloqué, tandis qu'en courant, il s'agit de l'aptitude à laisser passer des courants directs et inverses à l'état passant, [8], cette dernière réversibilité est une condition importante pour les systèmes de charge et décharge des batteries.

II.2. Les convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est un système qui permet d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné. Suivant le type de récepteur (machine à commander par exemple) et la nature de la source de puissance (monophasée ou triphasée), on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques, [9].

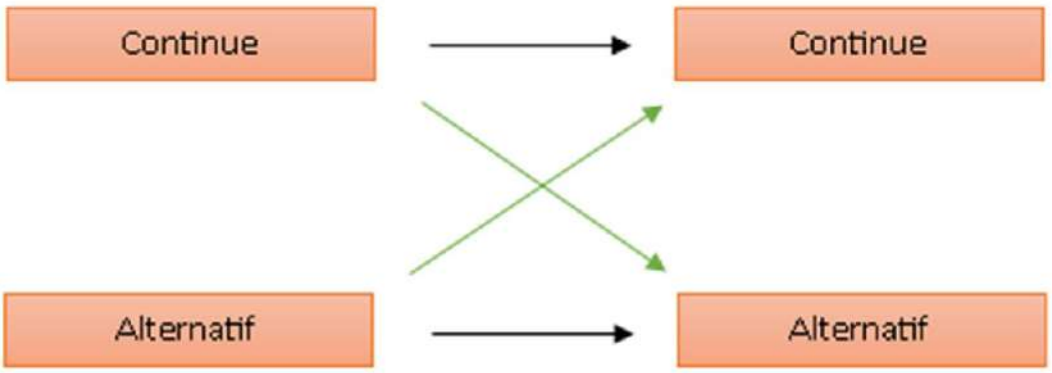


Figure II.1. Les différents types des convertisseurs, [10].

II.2.1. Convertisseur alternatif/continu (redresseur)

Les redresseurs sont des convertisseurs d'énergie, également appelés convertisseurs alternatif/continu. Ils sont utilisés dans la Chaine de traction dans un véhicule électrique, les redresseurs sont utilisés pour transformer une tension ou un courant alternatif en son équivalent continu. Il est essentiellement utilisé dans le réseau de distribution à 50 Hz, [11].

II.2.2. Convertisseur continu/alternatif (onduleur) :

Un onduleur, également appelé convertisseur continu/alternatif, est un appareil qui permet de convertir une tension continue en tension alternative sinusoïdale. Il est assisté si la fréquence et la tension sont imposées par le réseau, dans ce cas nous pouvons régler la fréquence et la tension. Il peut être utilisé comme source d'alimentation d'un moteur asynchrone, [12].

II.2.3. Convertisseur alternatif/alternatif (Gradateur)

Le gradateur est un montage qui permet de contrôler la puissance absorbée par un récepteur en régime alternatif sans changer la fréquence de l'onde alternative de la source, [11].

II.2.4. Convertisseurs continu/continu (Hacheur)

Dans un système de conversion des énergies photovoltaïques, les convertisseurs sont utilisés pour bien adapter la source à la charge. On s'intéresse dans ce chapitre à l'étude des convertisseurs DC/DC (hacheurs) qui permettant d'obtenir une tension continue de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue fixe (batterie d'accumulateurs ou bien pont redresseur - muni d'un filtre LC- alimenté par le réseau de distribution). L'utilisation des convertisseurs DCDC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé, [11].

II.3. Généralités sur les convertisseurs DC/DC

Les hacheurs sont des convertisseurs continu/continu qui ont pour but de contrôler le transfert et l'écoulement de l'énergie entre les panneaux solaires et la charge. Ils permettent de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Ils sont souvent utilisés comme une interface.

II.3. 1. Applications des convertisseurs DC/DC

Les convertisseurs DC/DC en général réalisent deux fonctions : modifier le niveau de tension (élever ou abaisser) et réguler la tension. L'électronique de conversion se trouve à l'interface entre les batteries (la source d'énergie en général) et l'ensemble des blocs constitutifs du système

considéré, des circuits électroniques numériques et analogiques, des batteries d'accumulation, des moteurs, etc. Les niveaux de puissance que l'on trouve dans les convertisseurs vont de moins d'un watt dans les convertisseurs des équipements portables, à une dizaine ou centaine de watts dans les alimentations des ordinateurs de bureau, aux kilowatts ou mégawatts dans la commande des moteurs à vitesse variable, et jusqu'aux térawatts dans les centrales électriques du secteur.

II.3.2. Types des convertisseurs DC/DC

Il y a plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie est réversible ou non réversible, isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage, les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Fly back, en demi-pont et en pont complet. Dans les applications où le couplage est avec le réseau électrique, les systèmes emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté, [12]. Tandis que, les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entrainement des moteurs à courant continu ou dans les systèmes de charge et décharge des batteries de moyenne et faible tension. Ces topologies sont encore classées en plusieurs catégories comme le montre la figure suivante :

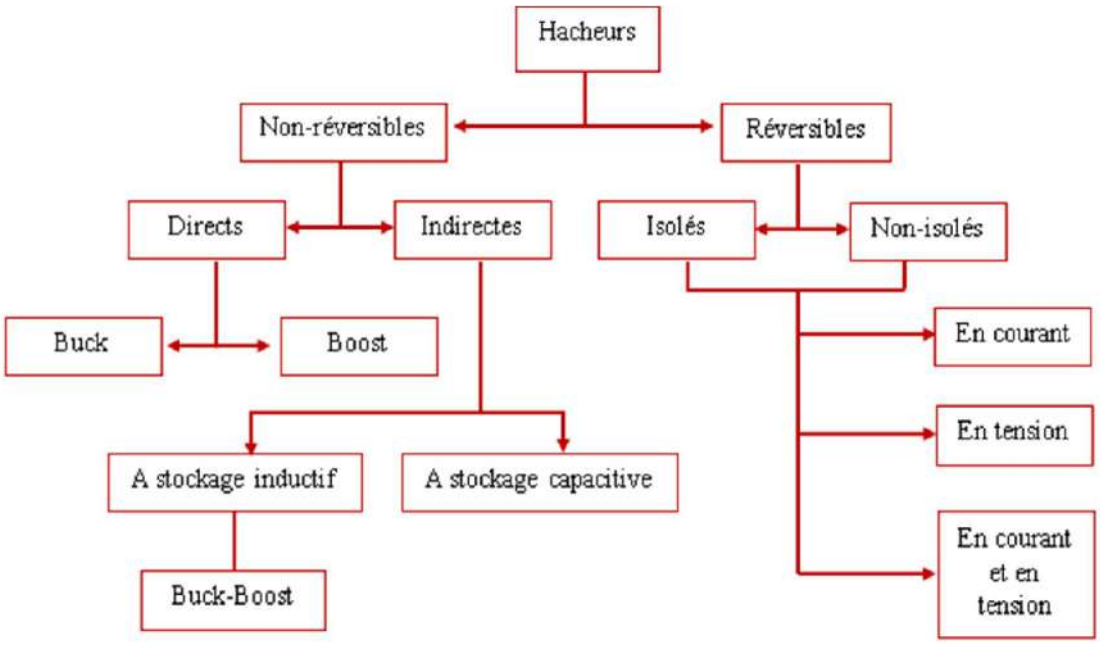


Figure II.2. Types de convertisseurs DC/DC, [12].

Dans notre travail on va étudier les convertisseurs réversibles et non réversibles, et on va donner une attention particulière au convertisseur non isolés, parce qu'on ne va pas étudier des connexions avec des grande tensions. Commençons par les convertisseurs non réversibles.

II.4. Convertisseurs DC/DC non réversibles

Ce sont des structures de hacheurs, non isolés, qui n'assurent pas la réversibilité, ni en tension, ni en courant. L'énergie ne peut donc aller que de la source vers la charge ou vers un système de stockage d'énergie, [24]. Dans ce cas de convertisseur, on a deux types **:** des hacheurs **à liaison directe** qui associent deux sources de nature différentes. Ils ne permettent ne permettent le réglage du transfert d'énergie qu'entre des sources de natures différentes, l'une de tension et l'autre de courant. Si on veut régler un transfert d'énergie entre deux sources de même nature, il faut utiliser un convertisseur **à liaison indirect**, c'est-à-dire un convertisseur comportant un étage intermédiaire avec un élément de stockage d'énergie : inductance ou condensateur, [13].

Les topologies des convertisseurs non réversibles ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entrainement des moteurs à courant continu. Ces topologies sont encore classées en trois catégories :

- Abaisseurs (Buck)
- Elévateurs (Boost)
- Elévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost)

II.4.1. Hacheur série (convertisseur Buck)

Nommé également hacheur abaisseur, dévolteur, série ou bien de type Buck, ce convertisseur convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur, comme le montre la figure II.3, il est composé d'un interrupteur électronique de puissance *Q* commuté périodiquement suivant les ordres d'un circuit de commande ou de régulation, composé également d'une inductance *L*, d'une diode *D*, et d'un condensateur *C*, la résistance *R* n'est qu'une charge, [14].

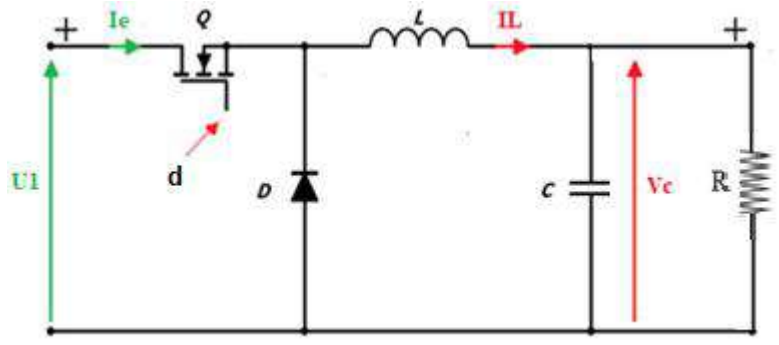
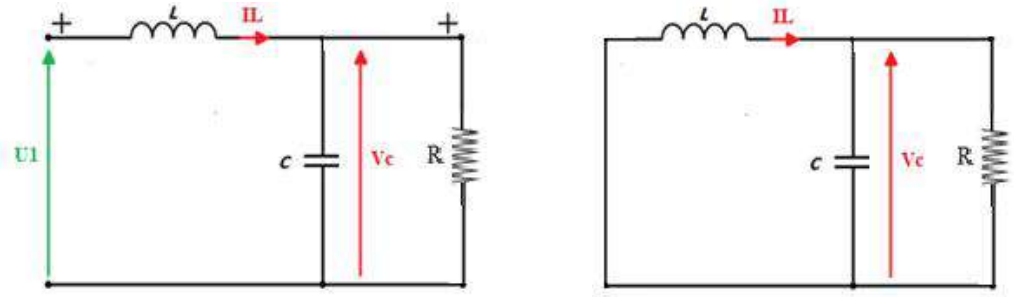


Figure II.3. Schéma électrique de base du convertisseur Buck.

II.4.1.1. Principe de fonctionnement et modélisation

Si l'interrupteur Q est activé (Mode ON, Figure II.4.a) par un signal de commande *d* (*d*=1), un courant circule dans le circuit, mais ne passe pas par la diode *D* puisqu'elle est inversement

polarisée. Le courant de l'inductance n'augmente pas immédiatement, mais plutôt linéairement avec un taux d'accroissement imposé par l'inductance *L*. Pendant ce temps, l'inductance emmagasine de l'énergie sous forme magnétique.



(a) Mode ON (b) Mode OFF

Figure II.4. Modes de fonctionnement du convertisseur Buck.

Pendant le fonctionnement en mode ON, et si nous choisissons la tension v_C et le courant qui travers l'inductance i_L comme variables, et avec une tension d'entrée u_1, le modèle correspondant est donné comme suit :

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L}v_C + \frac{1}{L}u_1 \qquad (II.1)$$

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{RC}v_c \qquad (II.2)$$

Si l'interrupteur Q est désactivé (*d*=0) après un temps *t* (Mode OFF, Figure II.4.b), la charge est déconnectée de son alimentation. Le courant est toutefois maintenu par l'énergie stockée dans l'inductance *L* et circule à travers la diode *D* appelée (diode de roue libre). Cette dernière permet d'évacuer l'énergie emmagasinée dans l'inductance à l'ouverture du commutateur sans créer de surtension.

Le condensateur *C* permet de réduire les piques du courant tiré de la source *U1* et d'atténuer les bruits. Le commutateur est activé et désactivé avec une fréquence de commutation $f = 1/T$. Quoi qu'il en soit, la valeur moyenne *Vc* est inférieure à *U1*. Pour ce mode OFF, les équations différentielles de la tension v_C et du courant i_L sont donnés comme suit :

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L}v_C \qquad (II.3)$$

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{RC}v_c \qquad (II.4)$$

Maintenant, c'est possible de fusionner les deux modèle (équation II.1 et II.2 avec les équations II.3 et II.4) des deux modes pour obtenir le modèle du convertisseur Buck qui sera valable pour

les deux modes, on va introduire pour cela le variable *d* qui représente le signal d et peut prendre deux valeurs, un ou zéro respectivement pour les modes ON et OFF, le model est le suivant :

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L}v_C + \frac{d}{L}u_1 \quad (II.5)$$

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{RC}v_c \quad (II.6)$$

II.4.1.2. Dimensionnement du convertisseur Buck

Le dimensionnement d'un convertisseur Buck repose principalement sur le calcul de son rapport cyclique (on va le noté rapport d), de l'inductance L pour limiter l'ondulation du courant, et de la capacité C pour filtrer la tension de sortie. Voici les formules fondamentales et les paramètres clés à définir :

a. Le Rapport Cyclique (Rapport d) :

Il définit la proportion du temps durant lequel l'interrupteur est passant par rapport à la période totale T (où $T = 1/fs$ avec fs la fréquence de découpage). En négligeant les pertes :

$$d = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Vc}{U_1} \quad (II.7)$$

b. Calcul de l'Inductance L :

L'inductance est calculée en fonction de l'ondulation de courant souhaitée ΔI_{out} (ΔI_S) :

$$L = \frac{V_{out} \times (1-D)}{\Delta I_L \times f_s} = \frac{V_C \times (1-D)}{\Delta I_L \times f_s} \quad (II.8)$$

Sinon, l'inductance est calculée à partir de l'inductance minimale (L_{min}), et nous supposant que L doit être supérieur de 25% que L_{min}), c'est-à-dire :

$$L = 1.25 \times L_{min}$$

Avec :

$$L_{min} = \frac{R \times (1-D)}{2 \times f_s}$$

c. Calcul du Condensateur de Sortie C :

Le condensateur est dimensionné en fonction de l'ondulation de tension maximale autorisée ΔV_{out} (ΔV_C) :

$$C = \frac{\Delta I_L}{8 \times f_s \times \Delta V_{out}} \quad (II.9)$$

Le choix de la fréquence de commutation fs est crucial. Plus elle est grande, plus est petit le noyau de l'inductance, et plus elle est importante, les pertes par commutation de la puissance augmentent. Dans les deux modes cités en haut, l'adaptation entre la source et la charge est réalisée en

choisissant des valeurs adéquates du rapport cyclique. Généralement, pour les convertisseurs DC/DC, l'interrupteur est commandé par un signal PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

II.4.1.3. Exemple pour simulation

Nous supposons un convertisseur Buck avec une tension d'entrée $U_1 = 48\,V$, et nous souhaitons une tension de sortie $V_s = V_C$ de $18\,V$ (V désirée) pour une charge résistive $R = 10\ \Omega$. La fréquence de commutation est de $f_s = 40000Hz$ et l'ondulation souhaité est de 0.5%. A partir des équations (II.7), (II.8) et (II.9) on a trouvé les paramètres suivants :

d =0.37 (Rapport cyclique de 37%).

L=97.5μH.

C=100μF.

La simulation Matlab de ce convertisseur a donné les résultats représentés par la figure suivante :

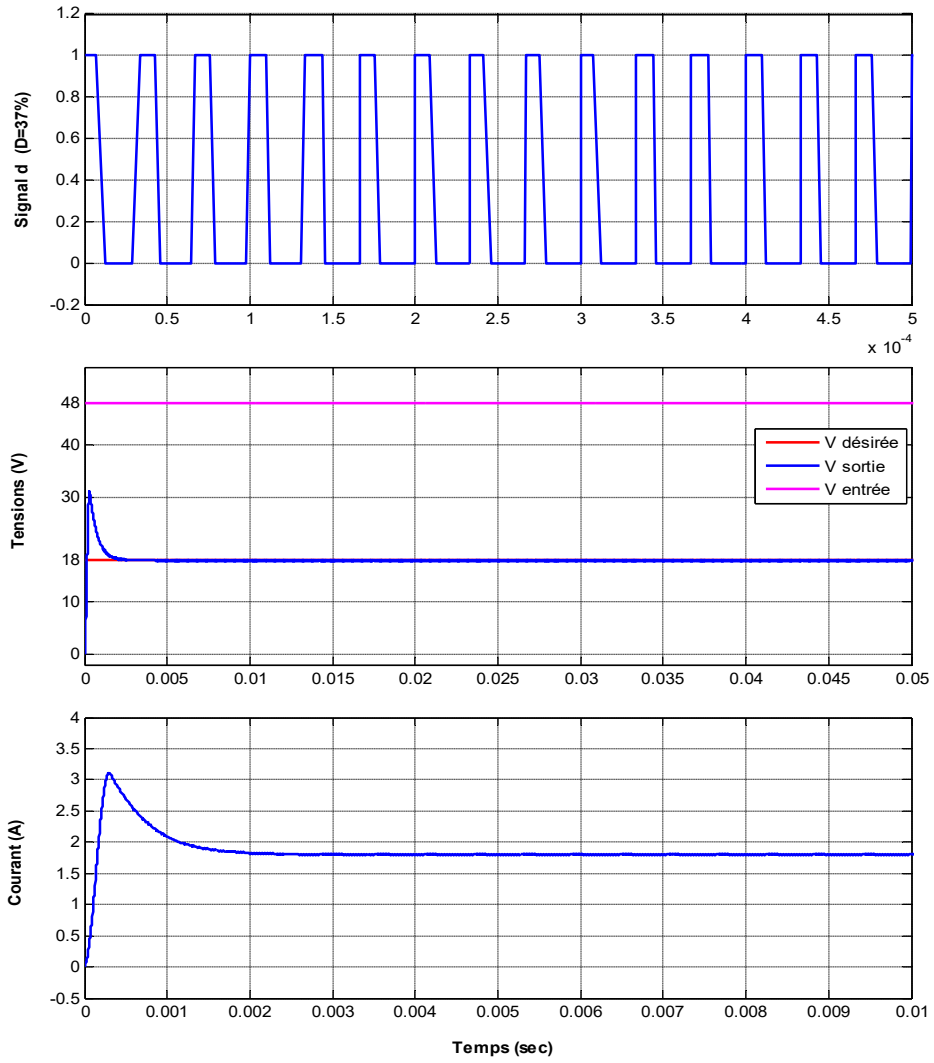


Figure II.5. Signal *d* (rapport 37%), tension et courant de sortie d'un convertisseur Buck.

II.4. 2. Hacheur parallèle (Convertisseur Boost)

Nommé également hacheur survolteur, le convertisseur Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Comme le montre la figure II.6, il est composé d'un interrupteur électronique de puissance *Q* commuté périodiquement à partir d'un circuit de commande ou de régulation, il est composé d'une inductance *L*, d'une diode *D*, et d'un condensateur *C*, mais avec un positionnement différent de celui du convertisseur Buck, la résistance *R* est une charge, [14].

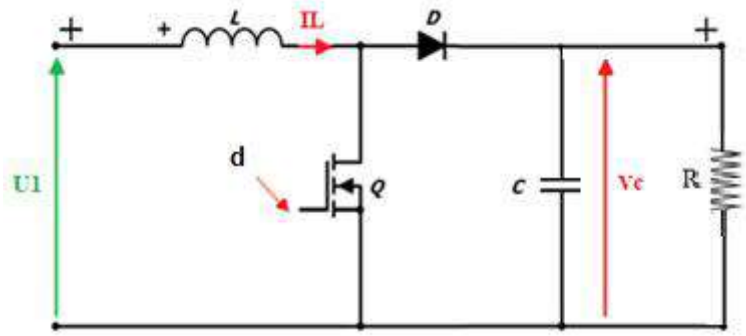


Figure II.6. Schéma électrique de base du convertisseur Boost, [10].

II.4.2.1. Principe de fonctionnement et modélisation

Le convertisseur Boost peut travailler suivant deux modes de fonctionnement dépendant de sa capacité de stockage d'énergie et de la période T de commutation. Ces deux modes de fonctionnement sont :

- Mode continu : dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance *L* est transférée partiellement et donc le courant dans celle-ci ne s'annule pas.
- Mode discontinu : dans ce cas, au contraire, l'énergie emmagasinée dans l'inductance *L* est transférée totalement et donc le courant dans celle-ci s'annule.

Le fonctionnement du circuit peut se diviser alors en deux selon l'intervalle de commutation (Le mode ON et le mode OFF).

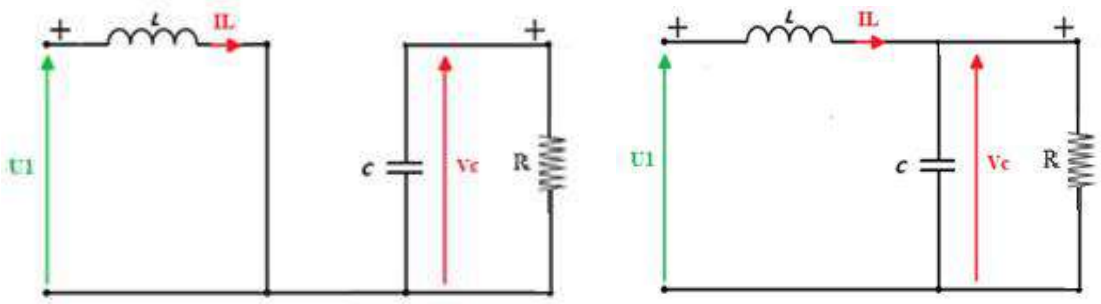


Figure II.7. Modes de fonctionnement du convertisseur Boost.

Le premier intervalle de fonctionnement (mode ON) est représenté sur la figure II.7, il commence quand on ferme l'interrupteur *Q* avec un signal de commande *d* (avec *d*=1). Le courant d'entrée, qui s'élève, traverse l'inductance *L* et le Mosfet (le transistor), ensuite, la tension de la charge chute immédiatement à zéro si le condensateur *C* est omis, [9], [10].

Les équations de la tension de sortie v_C et du courant qui travers l'inductance i_L obtenues en appliquant la loi des mailles à partir de la figure (Mode ON, Figure II.7.a) sont :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}u_1 \qquad (\text{II.10})$$

$$\frac{dv_c}{dt} = -\frac{1}{RC}v_c \qquad (\text{II.11})$$

Lorsque Q est désactivé (*d*=0) après un temps *t* (Mode OFF, Figure II.7.b), l'inductance se retrouve en série avec le générateur (signal d'entrée). S'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant i_L traversant l'inductance traverse ensuite la diode *D*, le condensateur *C* et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers le condensateur. Le courant décroît ensuite progressivement, car la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée $v_C > u_1$. Pour ce mode OFF, les équations différentielles de la tension v_C et du courant i_L sont donnés comme suit :

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L}v_C + \frac{d}{L}u_1 \qquad (\text{II.12})$$

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{RC}v_c \qquad (\text{II.13})$$

La diode *D* permet d'éviter la décharge du condensateur *C*, lorsque le commutateur est activé. Le condensateur est supposé assez grand pour pouvoir lisser la tension de la charge. C'est possible de remarquer que le mode OFF du convertisseur Boost est similaire au mode ON du convertisseur Buck, et les équations de tension et du courant sont les mêmes.

Remarque importante : il faut faire la différence entre le **signal d** de commande de l'interrupteur (qu'il peut prendre deux valeur 1 et 0, respectivement pour le mode ON et le mode OFF de l'interrupteur) et le **rapport d** qui définit les temps $Ton = dT$ (interrupteur ouvert) et $Toff = (1-d)T$ (interrupteur fermé).

A partir des deux modèle (équation II.10 et II.11 avec les équations II.12 et II.13) des deux modes, il est possible de trouver le modèle du convertisseur Boost valable pour les deux modes, on va introduire pour cela le variable lié au signal *d* (dans ce cas 1-d) et peut prendre deux valeurs, un ou zéro respectivement pour les modes ON et OFF, le model est le suivant :

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{(1-d)}{L} v_C + \frac{1}{L} u_1 \quad (II.14)$$

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{(1-d)}{C} i_L - \frac{1}{RC} v_c \quad (II.15)$$

II.4.2.2. Dimensionnement du convertisseur Boost

Le dimensionnement d'un convertisseur Boost repose principalement sur le calcul de son rapport cyclique (on va le noté rapport D), de l'inductance L pour limiter l'ondulation du courant, et de la capacité C pour filtrer la tension de sortie. Voici les formules fondamentales et les paramètres clés à définir :

a. Le Rapport Cyclique (Rapport d) :

Il définit la proportion du temps durant lequel l'interrupteur est passant par rapport à la période totale T (où $T = 1/fs$ avec fs la fréquence de découpage). En négligeant les pertes :

$$\frac{1}{1-d} = \frac{Vs}{V_{in}}$$

Ce qui donne :

$$d = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} = 1 - \frac{U_1}{Vc} \quad (II.16)$$

b. Calcul de l'Inductance L :

L'inductance est calculée à partir de l'inductance minimale (L_{min}), et nous supposant que L doit être supérieur de 25% que L_{min}), c'est-à-dire :

$$L = 1.25 \times L_{min} \quad (II.17)$$

Avec :

$$L_{min} = \frac{R \times (1-D)}{2 \times f_s} \quad (II.18)$$

c. Calcul du Condensateur de sortie C :

Le condensateur est dimensionné en fonction de l'ondulation de tension maximale autorisée ΔV_{out} (ΔV_C) :

$$C = \frac{D}{R \times f_s \times \Delta V_{out}} \quad (II.19)$$

Comme nous avons dit précédemment, le choix de la fréquence de commutation fs est crucial. Plus elle est grande, plus est petit le noyau de l'inductance, et plus elle est importante, les pertes par commutation de la puissance augmentent. Dans les deux modes cités en haut, l'adaptation entre la source et la charge est réalisée en choisissant des valeurs adéquates du rapport cyclique. Nous rappelons aussi que les interrupteurs (Mosfet ou IGBT) sont commandés par un signal PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

II.4.2.3. Exemple pour simulation

Nous supposons un convertisseur Buck avec une tension d'entrée $U_1 = 12\,V$, et nous souhaitons une tension de sortie $V_s = V_C$ de $24\,V$ (Tension de sortie désirée) pour une charge résistive $R = 10\ \Omega$. La fréquence de commutation est de $f_s = 40000Hz$ et l'ondulation souhaité est de 0.5%. A partir des équations (II.16), (II.17) et (II.19) nous avons trouvé les paramètres suivants :

d =0.50 (Rapport cyclique de 50%).
L=19.53μH.
C=25μF.

La simulation Matlab de ce convertisseur a donné les résultats représentés sur la figure suivante :

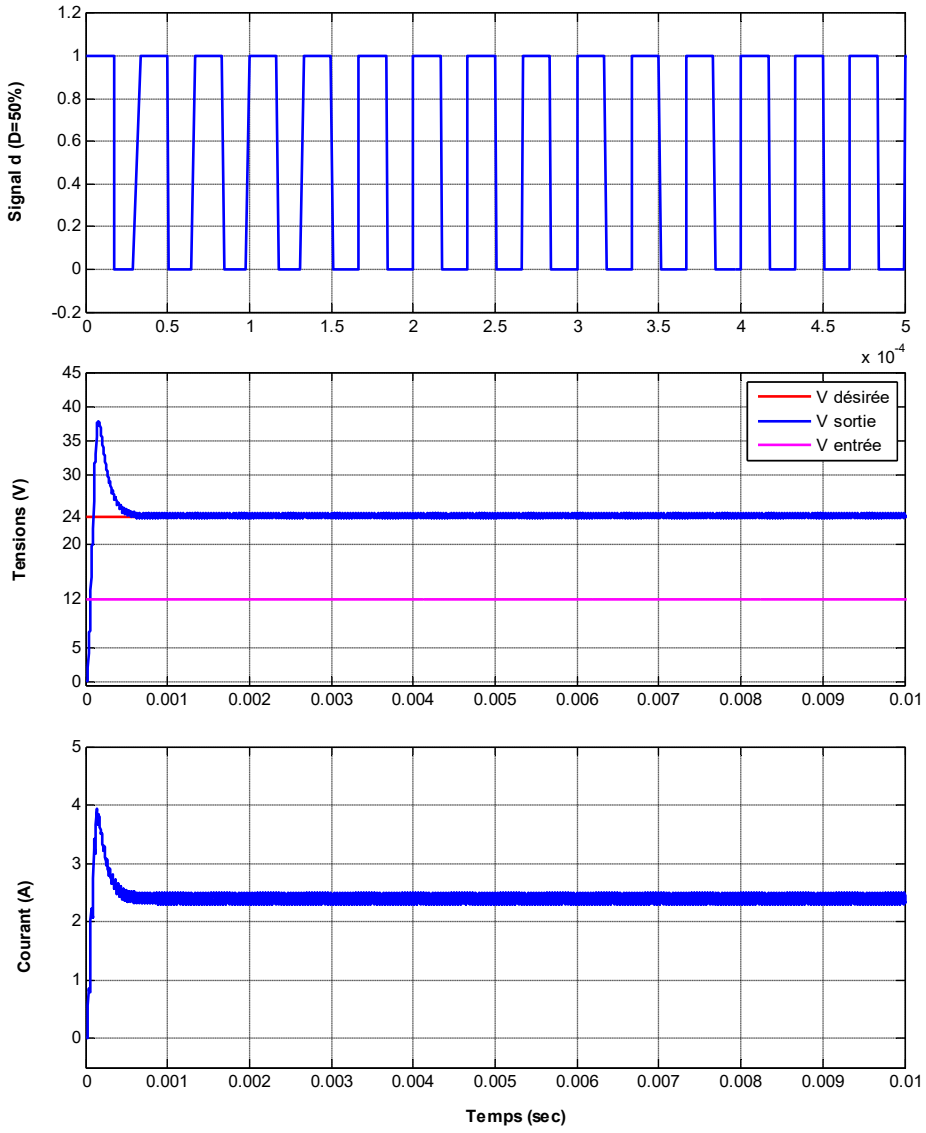


Figure II.8. Signal *d* (rapport 50%), tension et courant de sortie d'un convertisseur Boost.

II.4.3. Hacheur série-parallèle (Convertisseur Buck-Boost)

Hacheur inverseur, dévolteur-survolteur, de type Buck-boost est un convertisseur qui a une topologie combinée en cascade du convertisseur Buck et du convertisseur Boost. Comme on le sait, le convertisseur Buck-Boost inverse la polarité de sa sortie par rapport à son entrée, ceci est dû à sa configuration. Il est composé d'un interrupteur de puissance *Q*, d'une inductance *L*, d'une diode *D*, et d'un condensateur de sortie *C*, voire la figure II.9.

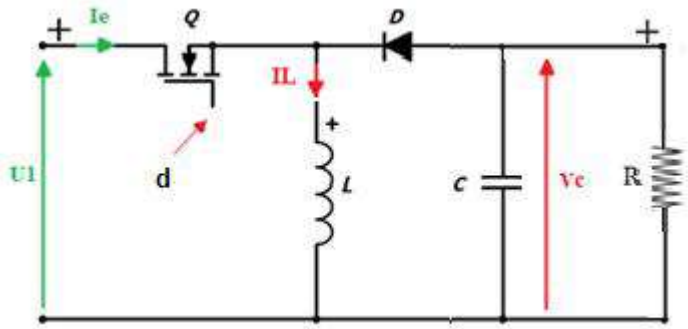


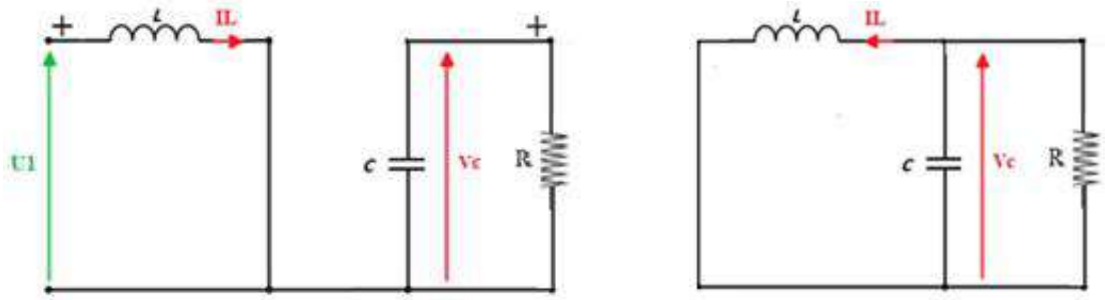
Figure II.9. Schéma électrique de base du convertisseur Buck-Boost.

II.4.3.1. Principe de fonctionnement et modélisation

Le principe de fonctionnement d'un hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source-charge à l'aide d'un interrupteur électronique (commutateur *Q*). Le commutateur *Q* est commandé par un signal de modulation de largeur d'impulsion MLI qui est généré dans le circuit de commande. En mode de conduction continue, le convertisseur Buck-Boost possède deux phases de fonctionnement, [14] :

- Interrupteur de puissance fermé, diode ouverte.
- Interrupteur de puissance ouvert, diode fermée.

La figure au-dessous représente les deux phases du circuit qui peut se diviser alors en deux selon l'intervalle de commutation (Le mode ON où l'interrupteur de puissance est fermé avec un signal d=1 et le mode OFF où il sera non commandé, avec un signal d=0)



(a) Mode ON (b) Mode OFF

Figure II.10. Modes de fonctionnement du convertisseur Buck-Boost.

Durant l'état « ON », l'énergie apportée par la source est stockée dans l'inductance *L* (figure I.9.a), cette énergie est livrée ensuite à la charge pendant l'état « OFF » (figure II.9.b). En raison de la présence de la diode *D*, le courant circule à travers l'inductance *L* seulement dans une direction durant les deux états. Par conséquent, la tension de sortie V_c a une polarité opposée à la tension d'entrée u_1. Pour cette raison, ce circuit est aussi appelé convertisseur inverseur comme nous l'avons déjà appelé. Les équations décrivant ce circuit peuvent être obtenues de la même manière qu'au paravent ; pendant l'état « ON », l'inductance est chargée via u_1 défini en (II.13). Il n'y a pas de flux de courant vers le condensateur et résistance dans cet état, où il est nul tel que défini en (II.14).

$$u_1 = L\frac{di}{dt} \tag{II.20}$$

$$0 = C\frac{dvc}{dt} + \frac{v_c}{R} \tag{II.21}$$

A partir de ces équations précédentes, on obtient le modèle du convertisseur Buck-boost dans l'état « On » ou l'interrupteur *Q* soit commandé (d=1), voir la figure II.10.a. D'ailleurs il est similaire à l'état ON du convertisseur Boost, les équations (II.15) et (II.16) suffis pour modéliser ce mode :

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L}u_1 \tag{II.22}$$

$$\frac{dvc}{dt} = -\frac{1}{RC}v_c \tag{II.23}$$

Pendant l'état « Off », figure II.10.a, le fonctionnement est similaire au convertisseur Buck dans l'état « OFF » où u_1 est égal à zéro, mais ses états de sortie V_c et I_L sont de polarité inversée en raison de la décharge de l'inductance, comme indiqué dans (II.17) et (II.18) respectivement.

$$-v_c = -L\frac{dI_L}{dt} \tag{II.24}$$

$$-I_L = C\frac{dvc}{dt} + \frac{v_c}{R} \tag{II.25}$$

On obtient alors :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L}v_c \tag{II.26}$$

$$\frac{dvc}{dt} = -\frac{1}{C}I_L - \frac{1}{RC}vc \tag{II.27}$$

Alors, le modèle du convertisseur Buck-Boost pour ses deux états « ON » et « OFF » peut être formulé en tenant compte du cycle de service et du signal de commutation d, il sera comme suit :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1-d}{L}v_c + \frac{d}{L}u_1 \tag{II.28}$$

$$\frac{dvc}{dt} = -\frac{1-d}{C}I_L - \frac{1}{RC}vc \tag{II.29}$$

II.4.3.2. Dimensionnement du convertisseur Buck-Boost

Comme pour le convertisseur Buck et le convertisseur Boost, le dimensionnement du convertisseur Buck- Boost repose sur le calcul de son rapport cyclique *D*, de l'inductance *L* pour limiter l'ondulation du courant à une limite ΔI_{out} (ΔI_S) donnée ci-dessous, et de la capacité *C* pour filtrer la tension de sortie. Voici les formules fondamentales et les paramètres clés à définir :

a. Le Rapport Cyclique (Rapport d ou nommé D également) :

Le Rapport *d* définit la proportion du temps durant lequel l'interrupteur est passant par rapport à la période totale *T*. En négligeant les pertes, on écrit la relation suivante :

$$Vc = \frac{d}{1-d}\, u_1 \tag{II.30}$$

Ce qui donne :

$$d = \frac{V_{out}}{V_{out}+V_{in}} = \frac{Vc}{Vc+u_1} \tag{II.31}$$

b. Calcul de l'Inductance *L* :

L'inductance est calculée en fonction de :

$$L = \frac{R\times(1-D)^2}{2\times f_s} \tag{II.32}$$

Et le courant de l'inductance sera :

$$I_L = \frac{u_1 D}{R\times(1-D)^2} \tag{II.33}$$

Avec un taux d'ondulation de :

$$\Delta I_L = \frac{u_1 DT}{L} \tag{II.34}$$

c. Calcul du Condensateur de sortie *C* :

Le condensateur est dimensionné en fonction de l'ondulation de tension maximale autorisée ΔV_{out} (ΔV_C) :

$$C = \frac{D}{R\times f_s \times \Delta V_{out}} \tag{II.35}$$

Il est important de noter que dans beaucoup de configurations des convertisseurs Buck, Booste et Buck-Boost on trouve un deuxième condensateur juste à l'entrée à côté de la source **(**noté $\boldsymbol{C_1}$**)** comme le montre la figure suivante qui représente un convertisseur Buck-Boost, et de même pour les autres convertisseurs :

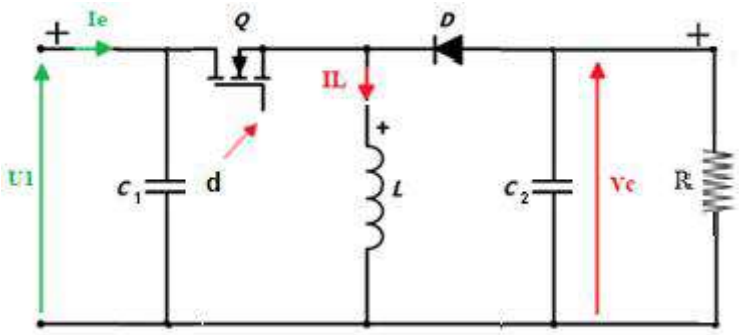


Figure II.11. Schéma électrique du convertisseur Buck-Boost avec deux condensateurs.

Le condensateur *C1* soutient la tension d'alimentation u_1, alors que *C2* lisse la tension de la charge comme nous avons déjà dit. Et en conclusion, l'amplitude de la tension de sortie *Vc* peut être inférieure ou supérieure à u_1 suivant la valeur de *Ton* et *Toff* d'un cycle *T* et par conséquence suivant le rapport cyclique *d*.

II.4.3.3. Exemple pour simulation

Nous supposons un convertisseur Buck avec une tension d'entrée $U_1 = 48\,V$, et nous souhaitons une tension de sortie $V_s = V_C$ de $15\,V$ (fonctionnement en mode Buck) en suite de $25\,V$ (fonctionnement en mode Boost) pour une charge résistive $R = 10\ \Omega$. La fréquence de commutation est de $f_s = 40000Hz$ et l'ondulation souhaité est de 0.5%.

A partir des équations (II.24), (II.25) et (II.27), et si nous appliquons les paramètres d'entrées et sorties données, on aboutit aux paramètres suivants :

d=0.40 (Rapport cyclique de 40%).
L=45μH.
C=100μF.

La simulation Matlab de ce convertisseur Buch-Boost a donné les résultats représentés par la figure II.12.

Comme il est montré sur la figure, nous avons changé le rapport cyclique de 40 à 60%, et en conséquence, la tension de sortie à varier de 15V à 25V en passant du mode convertisseur abaisseur Buck en mode convertisseur élévateur Boost. Le courant de sortie à augmenter avec l'augmentation de la tension par ce que la résistance de charge est constante et elle a la même valeur.

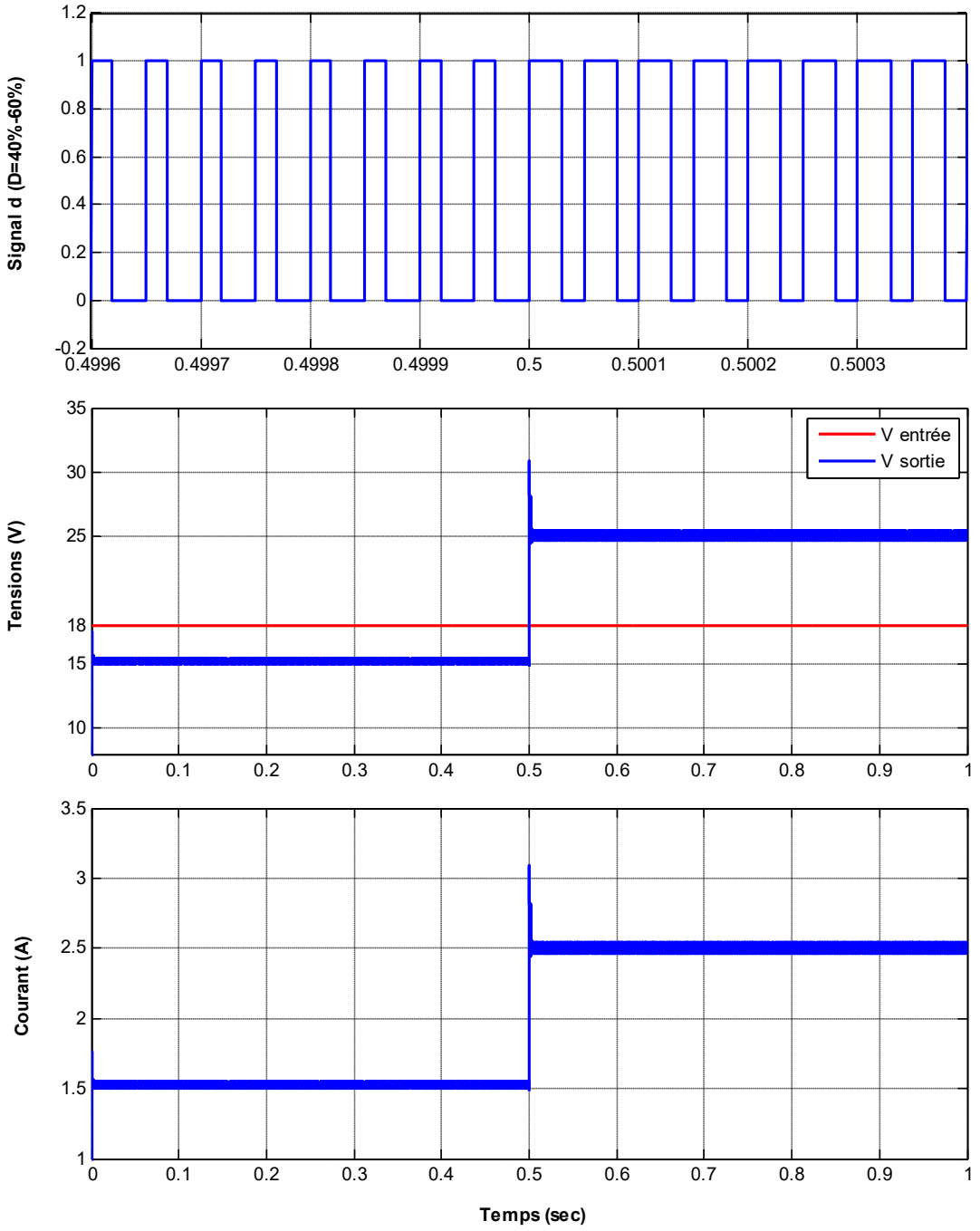


Figure II.12. Signal *d* (rapport 50%), tension et courant de sortie d'un convertisseur Buck-Boost.

II.5. Convertisseurs DC/DC réversibles (Bidirectionnels)

Ce sont des hacheurs qui assurent une réversibilité en tension et/ou en courant. Ainsi, il est possible d'inverser le sens de parcours de l'énergie. Une source (batterie par exemple) peut devenir une charge et inversement. Ce type de comportement se rencontre usuellement dans les systèmes d'entraînement électrique, dans les systèmes de charge et de décharge des batteries …etc. Ainsi, un moteur en sortie d'un hacheur représente une charge. Cependant, si on veut réaliser un freinage, le moteur va devenir une génératrice, ce qui va entraîner un renvoi d'énergie à la source (mieux qu'un simple freinage mécanique), [7]. Pour les systèmes de charge et de décharge des batteries, le cas est plus simple, la batterie reçoit de la puissance dans le mode de charge et donne de la puissance dans le cas contraire.

Dans ce cas, on a trois types **:**

- **Hacheur réversible en tension**

Il utilisé surtout pour l'entraînement d'une machine à courant continu MCC dans un sens de rotation pour le fonctionnement en moteur avec freinage par récupération dans l'autre sens de rotation (génératrice) c'est le cas des ascenseurs par exemple.

- **Hacheur réversible en courant**

Très employé pour l'entraînement d'une MCC dans un sens de rotation avec freinage par récupération. [16]

- **Hacheur réversible en courant et en tension**

Très souvent, employé pour l'entraînement d'une MCC dans les deux sens de rotation avec freinage par récupération, c'est surtout le cas de la traction électrique à courant continu, [17].

II.5.1. Types des convertisseurs DC-DC bidirectionnel

La plupart des convertisseurs DC-DC bidirectionnels existants se caractérisent par une alimentation en courant ou en tension d'un seul côté. En fonction de l'emplacement d'un dispositif de stockage d'énergie auxiliaire, les convertisseurs DC-DC bidirectionnels (BDC) peuvent être classés en deux types : Buck et Boost. Dans le type Buck, le dispositif de stockage d'énergie est placé du côté haute tension et, dans le type Boost, du côté basse tension.

Pour permettre le double flux de puissance dans les convertisseurs BDC, la cellule de commutation doit conduire le courant dans les deux sens. Elle est généralement mise en œuvre à l'aide d'un commutateur de puissance à semi-conducteur unidirectionnel tel qu'un MOSFET de puissance ou

un IGBT en parallèle avec une diode (ou une diode de corps), car il n'existe pas de commutateur de puissance permettant un flux de courant bidirectionnel.

Selon l'application, différents convertisseurs DC-DC sont utilisés pour moduler la tension d'entrée. En général, il existe deux types de base avec des sous types de convertisseurs BDC : non isolés et isolés (Figure II.13).

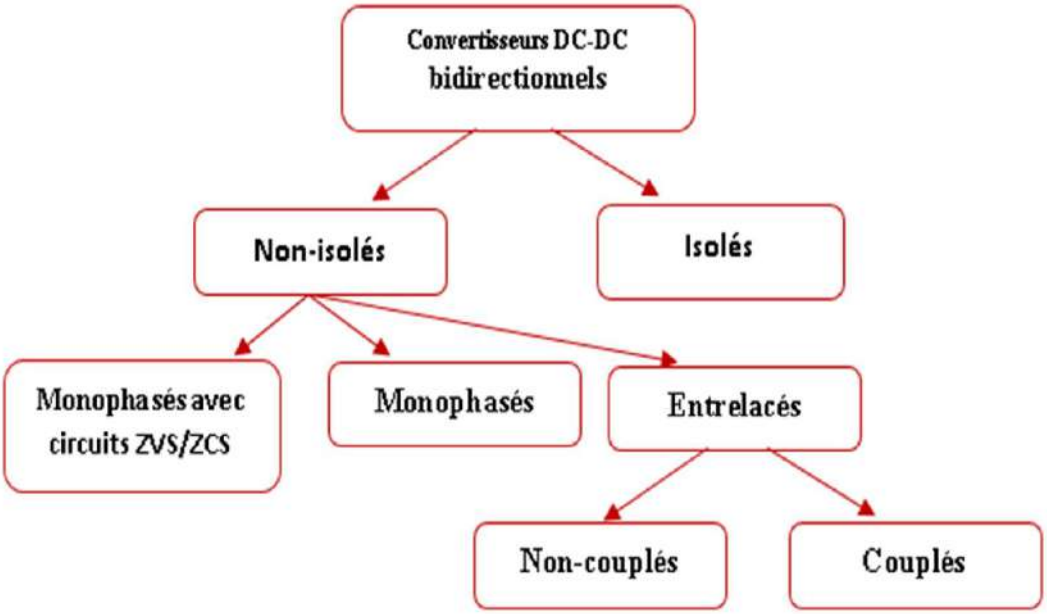


Figure II.13 : Classification simplifiée des convertisseurs de puissance DC-DC bidirectionnels[24]

II.5.1.1. Convertisseurs isolés bidirectionnels (IBDC)

La plupart, voir la totalité, des IBDC (Isolated Bidirectional Converter) de moyenne puissance présentent une structure simplifiée similaire à celle donnée par la figure II.14. Cette structure se compose de deux convertisseurs CC-CA à commutation haute fréquence et d'un transformateur à haute fréquence qui sert principalement à maintenir l'isolation galvanique entre deux sources. Ce transformateur est également indispensable pour l'adaptation de tension en cas de rapport de tension important entre deux sources. Le transformateur nécessite des grandeurs alternatives à ses bornes ; c'est pourquoi un convertisseur CC-CA est utilisé de chaque côté. Comme le système nécessite un transfert d'énergie dans les deux sens, chaque convertisseur CC-CA doit également être capable d'assurer un transfert d'énergie bidirectionnel. De même, les bus CC de cette structure doit également être capables de générer ou d'absorber de l'énergie. On suppose que les bus CC représentés dans cette structure présentent des caractéristiques de tension rigides, c'est-à-dire que leur impédance de Thévenin est négligeable.[25]

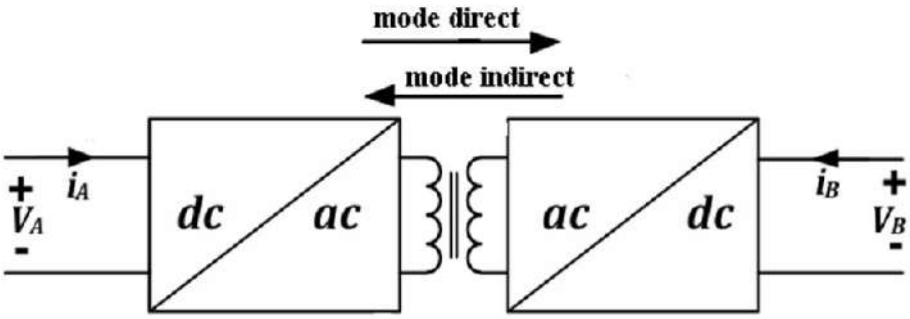


Figure II.14. Schéma principale d'un convertisseur bidirectionnel isolé

II.5.1.2. Convertisseurs BDC non-isolé

Dans ce mémoire, nous étudions les convertisseurs de puissance non isolés**.** Dans les systèmes de conversion de puissance non isolés sans transformateur, les convertisseurs DC-DC de type élévateur et de type abaisseur sont couramment utilisés. Le système à transformateur haute fréquence constitue une solution raisonnable pour obtenir une isolation entre le côté source et le côté charge. L'isolation est obligatoire lorsqu'un rapport de transformation très élevé est requis. Mais pour améliorer le rendement, la taille, le poids et le coût, le type non isolé est bien plus intéressant

La continuité du courant dans la batterie constitue également un critère de classification important. Elle influe sur la durée de vie de la batterie. Il est ainsi possible de choisir la solution la mieux adaptée à des tâches spécifiques. La figure II.15, présentent les schémas de base de convertisseur DC-DC abordé dans cette mémoire.[25]

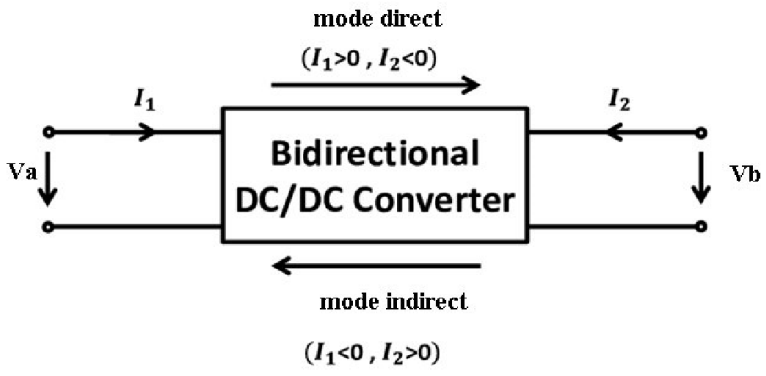


Figure II.15. Schéma principale d'un convertisseur bidirectionnel non-isolé

Il existe plusieurs types des convertisseurs BDC non-isolés comme monophasées avec circuit ZVS/WCS et entrelacé… etc, [17].[18]. Dans notre travail, on se limite et nous nous intéressons aux convertisseurs de type monophasé.

II.5.2. Circuits NBDC monophasés

II.5.2.1. Principes des circuits NBDC monophasés

Les convertisseurs DC-DC de base, tels que les convertisseurs abaisseurs et élévateurs, ne permettent pas un flux de puissance bidirectionnel. Cette limitation est due à la présence de diodes dans leur structure, qui empêchent le passage du courant en sens inverse. Un convertisseur DC-DC unidirectionnel peut être transformé en convertisseur bidirectionnel en remplaçant les diodes par un commutateur contrôlable. À titre d'exemple, la figure II.16 montre la structure des convertisseurs abaisseurs et élévateurs élémentaires. Il convient de noter que le convertisseur obtenu présente la même structure dans les deux cas et la différence sera au niveau des signaux de commande des deux interrupteurs Q1 et Q2, [25].

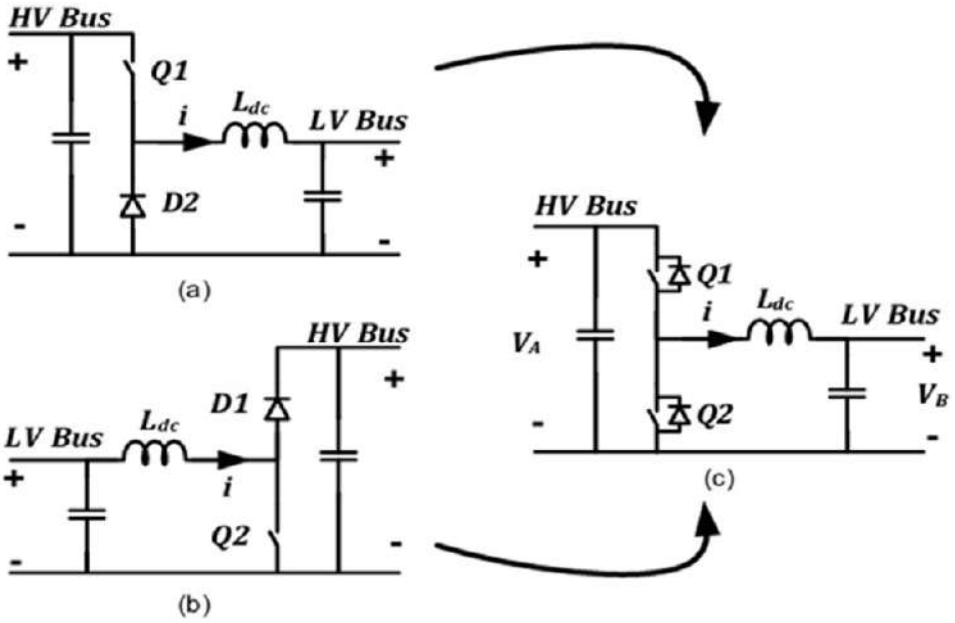


Figure II.16. (a) Convertisseur abaisseur unidirectionnel élémentaire, **(b)** convertisseur élévateur unidirectionnel élémentaire et **(c)** conversion en convertisseur bidirectionnel par le remplacement des diodes par un commutateur commandable.[25]

La figure II.17 présente les formes d'onde de base associées à la figure II.16. (c). En mode abaisseur, c'est-à-dire lorsque l'énergie est transférée du côté haute tension (HT) vers le côté basse tension (BT), Q1 est le commutateur actif tandis que Q2 reste désactivé. En mode élévateur, c'est-à-dire lorsque la puissance est transférée du côté BT vers le côté HT, Q2 agit comme un commutateur commandé et Q1 reste désactivé.

Le schéma de commutation lors de l'inversion de la puissance (du courant) est également illustré à la figure II.17. (b). La présence d'une inductance du côté BT entraîne un courant d'ondulation plus faible, ce qui est avantageux dans certaines applications. Par exemple, il est généralement

préférable de charger/décharger des batteries avec un faible courant d'ondulation afin d'obtenir un rendement plus élevé et une durée de vie plus longue. Parmi les principales limites associées au NBDC illustré à la figure II.16. (c), on peut citer :

- Il ne peut fonctionner qu'en mode abaisseur dans un sens et en mode élévateur dans l'autre. En termes techniques, cela signifie que le rapport de tension d, est important pour définir le mode de fonctionnement.
- Lorsque le rapport de tension devient important, cette structure perd son intérêt.
- L'absence d'isolation galvanique entre les deux côtés.

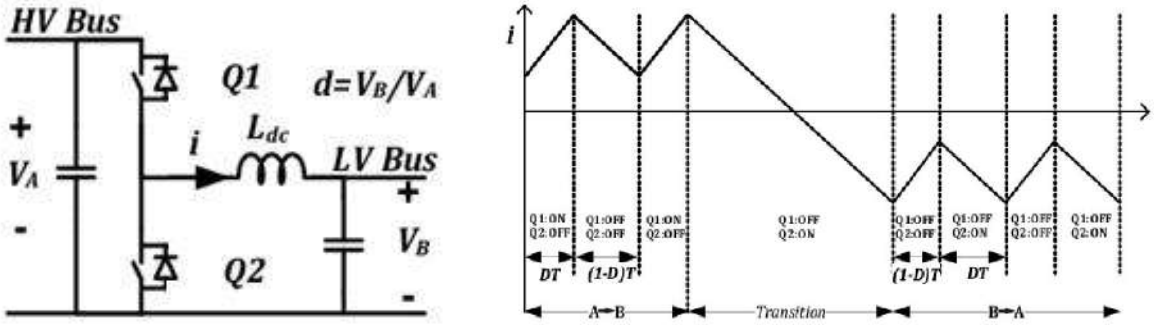


Figure II.17. (a) NBDC de base et **(b)** formes d'onde de fonctionnement.

Il est important de dire que c'est possible d'avoir le modèle du convertisseur donné par la figure II.16. (c), il peut être obtenue en mettant en cascade le convertisseur abaisseur avec le convertisseur élévateur [16]-[19], c'est une configuration a deux NBDC reliés dos à dos, voir la figure II.18. Cette topologie fonctionne dans tous les quadrants (convertisseur à 4 quadrants). Cela signifie qu'elle est capable d'effectuer des opérations d'abaissement et d'élévation de tension dans les deux sens. La topologie BDC Buck-Boost en cascade est la plus flexible. Elle présente toutefois plusieurs inconvénients : une augmentation du nombre de commutateurs de puissance et, par conséquent, un système de commandée des algorithmes de contrôle plus complexes, ainsi que des pertes à la conduction plus élevées dues au problème de récupération inverse des diodes de corps des transistors, [25].

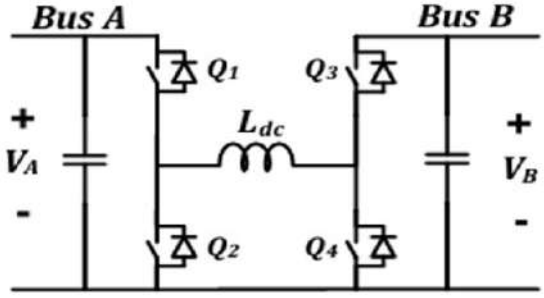


Figure II.18. Configuration a deux NBDC reliés dos à dos**.**

De nombreuses structures améliorées ont été proposées pour surmonter les deux premières limites. Lorsque les amplitudes des deux tensions de bus DC sont proches l'une de l'autre et qu'un rapport de tension inférieur ou supérieur à l'unité est requis, les convertisseurs Buck-Boost constitue le choix approprié. La figure II.16 montre la configuration de base d'un NBDC basé sur un convertisseur Buck-Boost. Il convient de noter que la polarité des bus C est inversée par rapport à une masse commune, ce qui constitue un inconvénient dans de nombreuses applications.

II.5.2.2. Configurations du système pour la charge/décharge d'une batterie

Le système de charge et décharge d'une batterie est constitué principalement d'un convertisseur Bidirectionnel qui travaille dans deux sens :

a) Mode charge :

Le fonctionnement de ce mode s'effectue suivant la configuration donnée par la figure II.19, l'existence d'une source de tension (avec une tension de source nommée Vin) est importante. Pour le convertisseur bidirectionnel il fonctionne avec le mode Buck et la tension de sortie doit être convenable avec la tension de batterie, la valeur du rapport cyclique est importante parce qu'il assure la charge pour certains intervalles, bien sur les signaux de commande des interrupteurs Q1 et Q2 sont définis par la technique PWM ou MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) pour définir un cycle qui correspond au rapport cyclique (il est noté D ou rapport d dans ce chapitre).

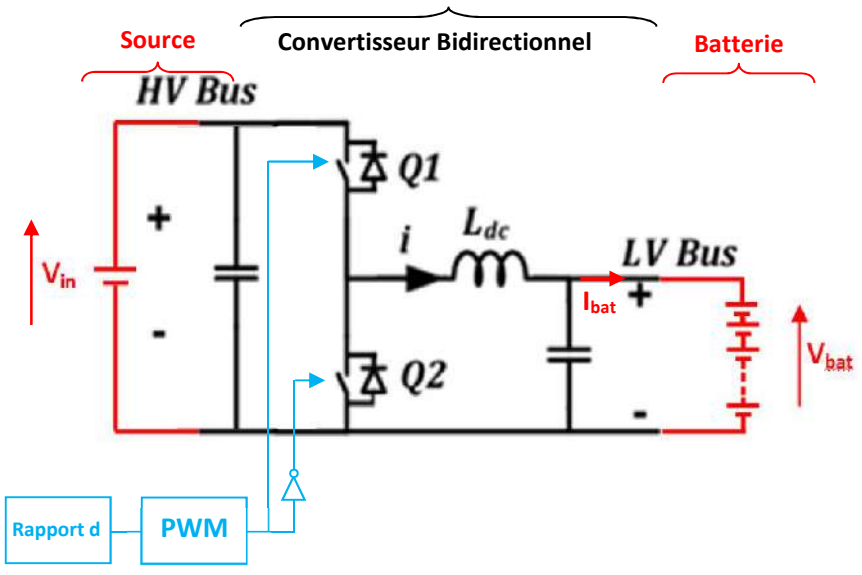


Figure II.19. Configuration du convertisseur NBDC pour le mode charge de la batterie

b) Mode Décharge :

Le fonctionnement de ce mode s'effectue suivant la configuration donnée par la figure II.20. La décharge de la batterie s'effectue vers une charge coté entrée, dans ce mode le courant de la batterie change le sens, c'est-à-dire le signe et le convertisseur Bidirectionnel change le mode de fonctionnement; il devient en mode Boost, la tension de sortie du convertisseur deviens Vch (tension de la charge) et la tension d'entrée sera la tension de la batterie., La valeur du rapport cyclique est toujours importante parce qu'il assure maintenant la décharge mais pour certains intervalle (valeurs) du rapport cyclique, les signaux de commande des interrupteurs Q1 et Q2 sont définis par la technique PWM.

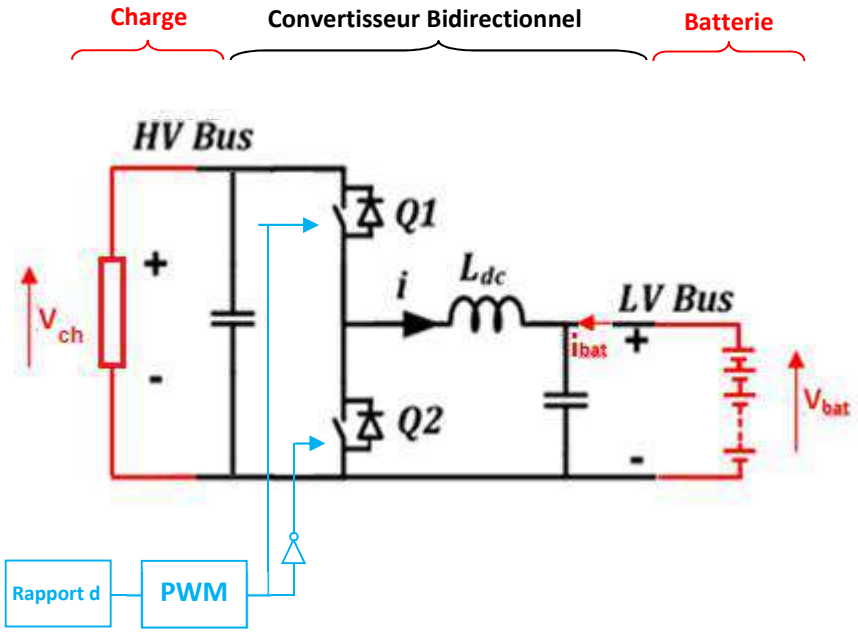


Figure II.20. Configuration du convertisseur NBDC pour le mode décharge

c) Tensions d'entrée et de sortie du convertisseur bidirectionnel :

Le fonctionnement du convertisseur bidirectionnel s'effectue en deux modes, comme nous avons déjà expliqué ; pour le premier mode (charge) il nous faut une source de tension (Vin) du coté entrée, le convertisseur fonctionne en mode Buck et en sortie nous avons placé une batterie pour quelle reçoit de l'énergie dans ce mode, mais surtout, elle fournit de l'énergie dans le mode décharge (elle joue le rôle d'une source dans le mode Boost) ou elle sera la source de tension unique (Vbat) pour la charge qui se trouve sur le côté sortie du convertisseur. La tension d'entrée initiale (Vin) ne sera pas disponible dans le mode décharge.

II.5.3. Simulation d'un système pour la charge/décharge d'une batterie

En se basant sur les deux configurations données par les deux figures II.19 et figure II.20, pour le fonctionnement en mode charge et décharge. Nous allons effectuer une simulation sur Matlab/Simulink. Le choix de la batterie est important, pour qu'elle soit convenable avec le convertisseur bidirectionnel utilisé dont ses paramètres de dimensionnement sont déterminés de la même manière que le dimensionnement des convertisseurs donné dans la section II.4. Nous avons choisi pour effectuer la simulation les grandeurs suivantes :

TAB II.1. Caractéristiques du système de charge/décharge avec d'une batterie

Tension de Batterie	Vbat=12 Volts
Tension de Batterie de charge max	$Vbat_{max}$=13.6 Volts
Tension de source	Vin= 24 Volts
Inductance du Convertisseur	L=10mH
Capacité du Convertisseur	C=100µf
Etat de charge initial	SOC(t0) =80%
Capacité nominale de la batterie	CN=20Ah

Afin de voir et évaluer les performances du convertisseur bidirectionnel pour la charge et la décharge de la batterie, on va effectuer deux tests de simulation sous MATLAB/Simulink. Mais, avant présenter les résultats, nous allons présenter l'évolution de la température de la batterie en fonction du temps, c'est paramètres importants pour l'évaluation de la tension à vide et de la résistance interne de la batterie (comme nous avons présenté au chapitre précédent).

La figure II.21 représente l'évolution de la température en fonction du temps. On a choisi que la température augmente progressivement de 20°C au début de la simulation jusqu'à atteindre une valeur proche de 55°C à la fin.

Les autres courbes qui représentent les autres grandeurs du système sont donnés sur les figures II.22 et II.23. Les principales grandeurs du système que nous avons représenté sont : le rapport cyclique, les signaux de commande des interrupteurs, l'état de charge de la batterie (SOC), le courant et la tension de la batterie.

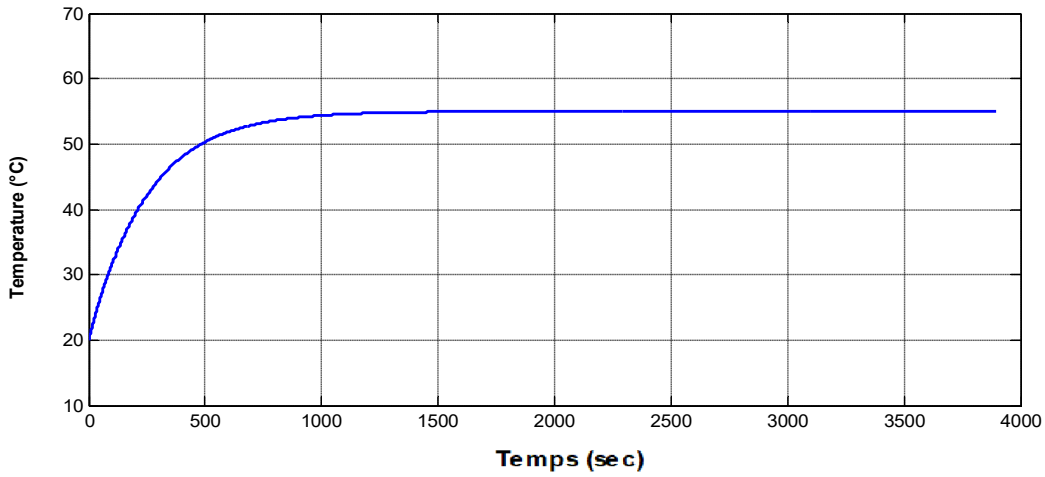


Figure II.21 : Evolution de la température en fonction du temps.

Il est important de noter que la variation du rapport cyclique (figure II.22) est un choix arbitraire de notre part, dont l'objectif est de permettre le passage du mode décharge au mode charge. Nous avons effectué une augmentation instantanée de sa valeur de 0,5 à 0,70 (c'est-à-dire de 50% à70%). La courbe du signal de commande est proportionnelle au rapport cyclique, comme le montre la même figure. Rappelant que le signal de commande des interrupteurs effectue une commutation entre les niveaux 0 et 1 en une fréquence notée f_s qui est une caractéristique d'un signal PWM utilisé pour piloter les interrupteurs de puissance du convertisseur. On observe que les transitions sont rapides et régulières, ce qui garantit une commande efficace du système.

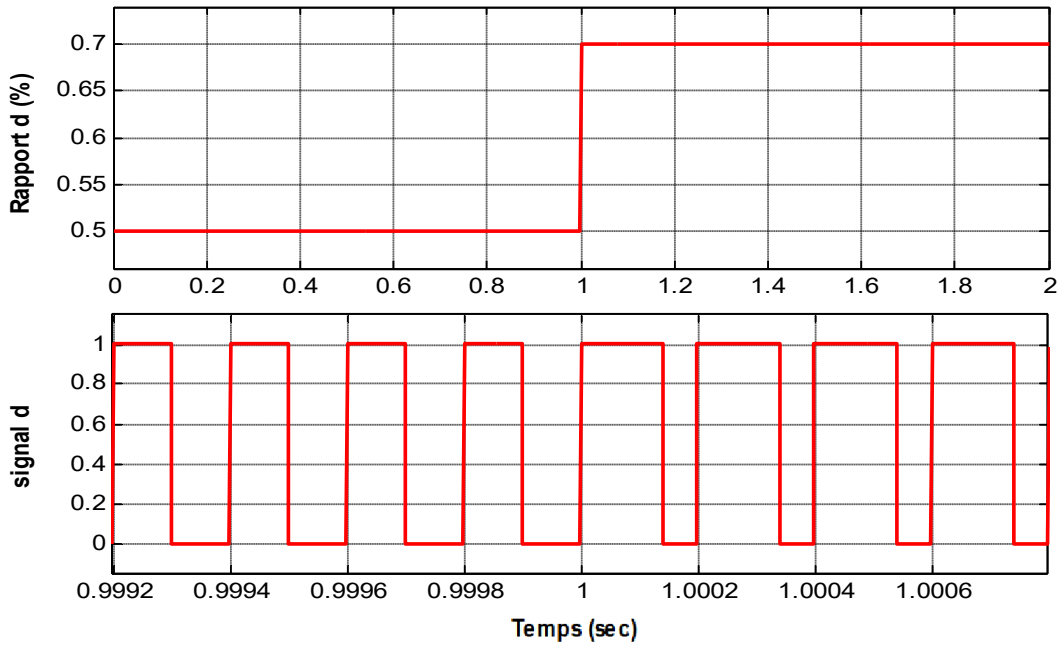


Figure II.22 : Variation de rapport d et du signal de commande d.

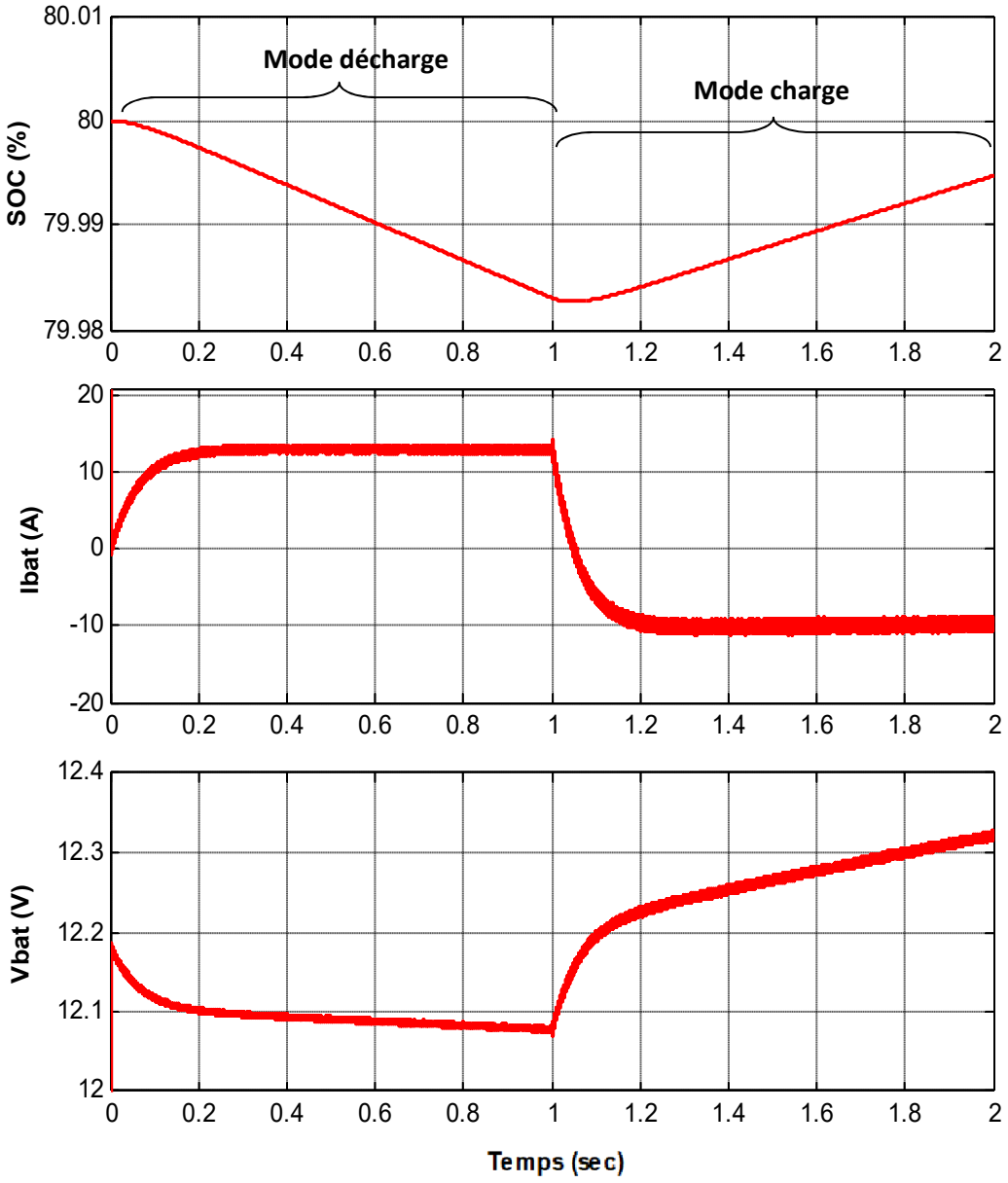


Figure II.23 : Evolution du SOC, du courant et de la tension de la batterie en mode charge et décharge.

Les résultats montrent l'influence directe du rapport cyclique (d) sur le comportement du convertisseur bidirectionnel, qui a effectué un fonctionnement en deux directions pour permettre le fonctionnement en deux modes, mode pour la charge de la batterie et un mode pour la décharge, voire la figure II.23, qui représente l'état de charge de la batterie (SOC), le courant et la tension de la batterie.

- **Mode décharge**

La figure II.23 montre que le SOC qui diminue progressivement de 80 % vers une valeur légèrement inférieure durant la simulation. Cette diminution indique que la batterie fournit de l'énergie au système, ce qui confirme le fonctionnement du convertisseur en mode décharge.

Le courant de batterie est positif pendant la phase de fonctionnement en décharge. Cela signifie que l'énergie quitte la batterie pour alimenter la charge. Après le régime transitoire initial, le courant se stabilise autour d'une valeur quasi constante, ce qui traduit une bonne stabilité de la commande.

La tension batterie diminue légèrement au cours du temps. Cette diminution est cohérente avec la diminution du SOC et la fourniture d'énergie par la batterie. Malgré cela, la tension reste dans une plage acceptable, ce qui montre que le convertisseur maintient un fonctionnement stable.

- **Mode charge**

Le SOC augmente progressivement au cours de la simulation. Cette évolution traduit l'accumulation d'énergie dans la batterie et confirme que celle-ci est en phase de charge. Le courant devient négatif et atteint rapidement une valeur stable après un court régime transitoire.

La tension augmente progressivement jusqu'à atteindre sa valeur de régime permanent. Cette augmentation est normale lors du chargement de la batterie et reflète l'énergie stockée dans celle-ci.

Remarque Importante :

Les grandeurs de la batterie, que ce soit la tension ou le courant, ne sont pas régulées, dans cette première partie de simulation, alors que la régulation de ces grandeurs est très importante pour les deux modes de fonctionnement. Mais comme même, il reste à dire que notre objectif est de faire fonctionner le convertisseur en deux modes ou bien sur les deux sens de fonctionnement.

Le problème de régulation des grandeurs sera fait dans le chapitre suivant. Malgré cela, on a essayé de faire une simulation juste pour montrer comment nous pouvons stabiliser le courant de batterie à une valeur constante. A travers cette régulation, on va déterminer le rapport cyclique qui sera un résultat obtenu de la boucle de réglage, il sera signal de sortie du régulateur. Tandis que, la grandeur à régler est le courant de batterie et pour le signal de référence, nous avons donné un courant de batterie de référence positif sur un intervalle et négatif sur un autre intervalle afin d’imposer le fonctionnement en deux modes charge et décharge de la batterie.

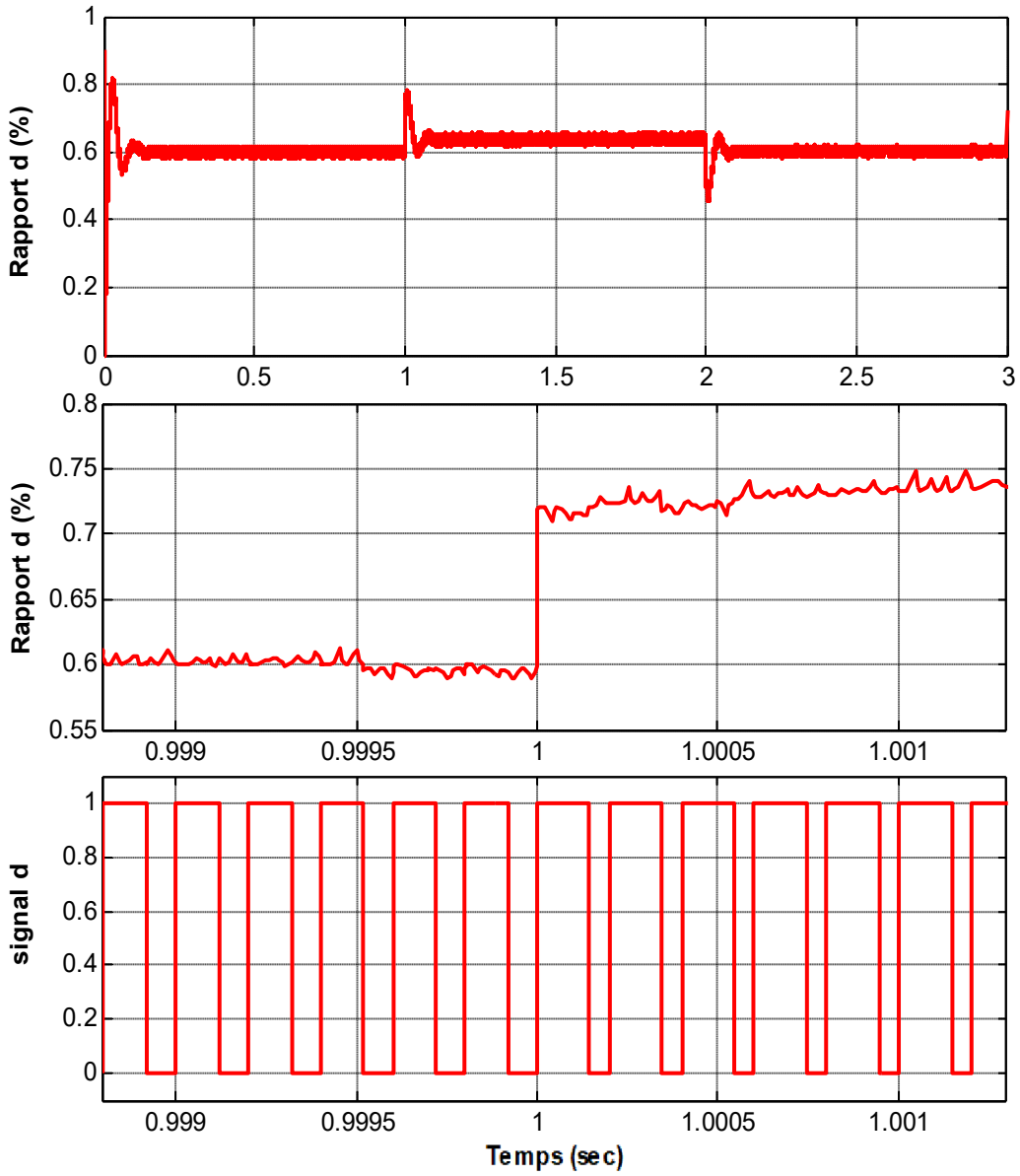


Figure II.24 : Évolution du rapport d et du signal de commande de convertisseur bidirectionnel.

La figure II.24 présente l'évolution du rapport cyclique *d* ainsi que du signal de commande généré pour piloter le convertisseur bidirectionnel. On observe que le rapport cyclique augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur proche de 0,8, puis se stabilise en régime permanent. Cette évolution traduit l'action du régulateur qui adapte continuellement la commande afin d'assurer le transfert de puissance nécessaire à la charge de la batterie. La stabilité de la courbe après le régime transitoire confirme les bonnes performances de la commande mise en œuvre.

Concernant le signal de commande, il varie entre le niveau 0 et 1 suivant une haute fréquence qui est une caractéristique du signal PWM utilisé pour commander les interrupteurs de puissance du convertisseur. Les commutations sont régulières et rapides, ce qui garantit un fonctionnement

correct du système. L'absence de perturbations ou d'oscillations importantes montre que la commande est stable et permet d'obtenir une réponse satisfaisante du convertisseur pendant toute la durée de la simulation.

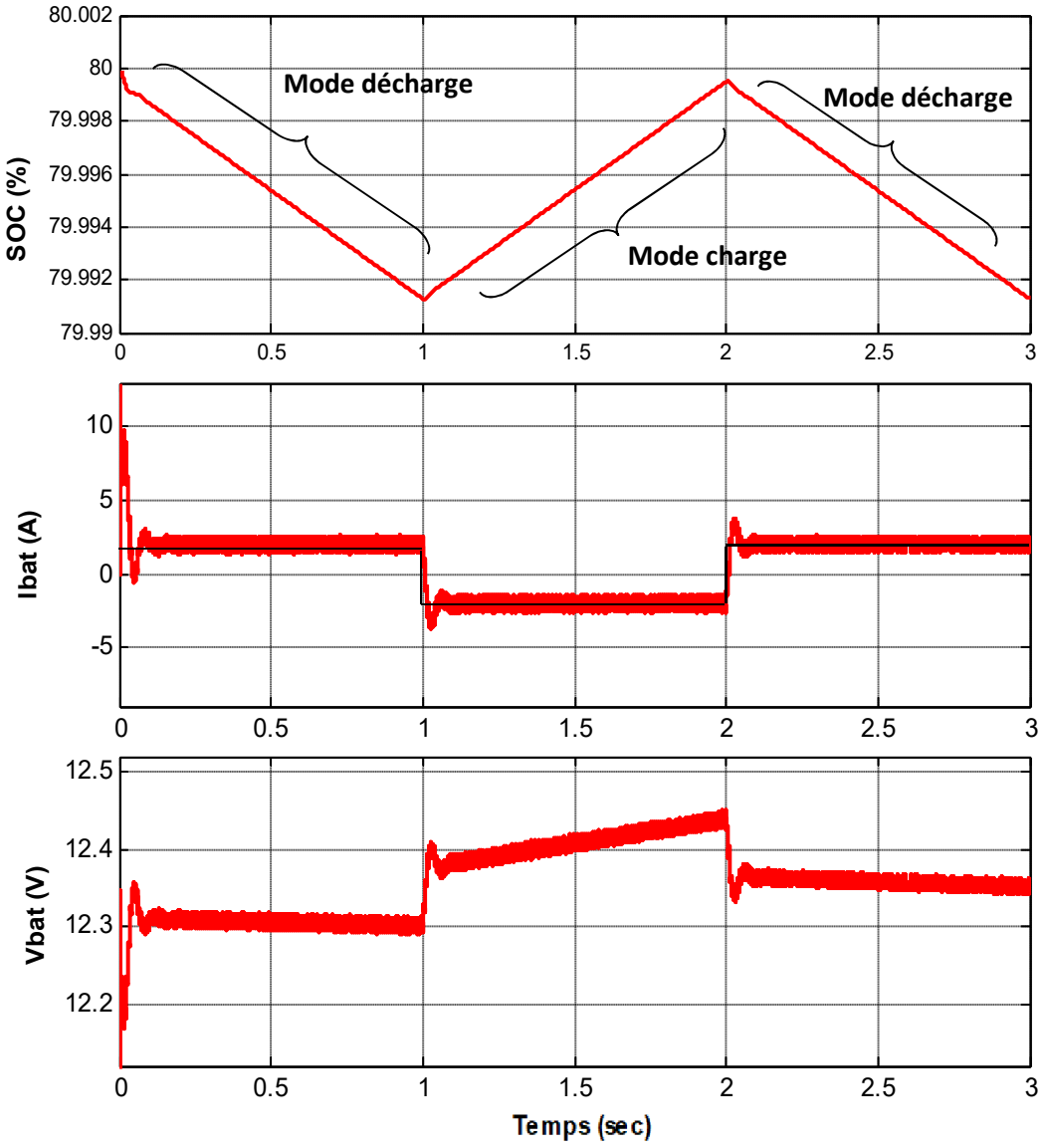


Figure II.25 : la variation du SOC, le courant et la tension de la batterie.

La figure II.25 montre la variation du SOC, le courant I_{bat} et la tension V_{bat} de la batterie en régime stable.

En remarque que le courant durant la période de décharge de la batterie est positif, c-à-dire le SOC diminue en conséquence, et durant la période de charge de la batterie, l'état de charge SOC augmente en bien sur le courant sera de signe négatif et la tension quand la batterie charge la tension augmente légèrement et pondant la décharge diminue. Pour la tension de la batterie V_{bat},

on remarque qu'elle est en variations continue presque, elle n'est pas régulée du tout alors que pour le fonctionnement correct des systèmes de charge et décharge des batteries, la tension des batteries est la première variable qui doit être régulé. Enfin, et comme nous avons dit précédemment le problème de réglage des paramètres de la batterie, notamment le courant I_{bat} et la tension V_{bat} sera traité dans le chapitre suivant.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une étude de présentation, structure, types, fonctionnement, architecture et surtout de modélisation des convertisseurs DC-DC, réversibles et non réversibles, qui peuvent être intégrés dans les systèmes de charge et de décharge des batteries. Nous avons vu que les convertisseurs réversibles ou nommé également bidirectionnels sont les plus utilisés dans ces systèmes, parce qu'ils peuvent fonctionner dans les deux sens de charge et de décharge, en mode Buck abaisseur dans un sens ou en mode Boost élévateur dans l'autre sens. Parce que le convertisseur bidirectionnel nécessite d'avoir deus source de tension sur les deux côtés, l'utilisation d'une batterie au Lithium-ion suffit pour faire fonctionner le convertisseur réversible parce qu'elle devient la source de tension en l'absence de la source de tension principale.

Dans la suite de ce travail, on va étudier la commande et le réglage de grandeurs importantes (le courant I_{bat}, la tension V_{bat} et la tension aux bornes de la charge) des systèmes à base de convertisseur Bidirectionnel dédier pour les systèmes convertisseurs-batteries qui assurent le fonctionnement en mode charge et décharge.

Chapitre III

Commande d’un système de charge/décharge d’une batterie Li-Ion

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude et la simulation d'un système de charge/décharge d'une batterie à base de convertisseur bidirectionnel utilisé à la fois dans les deux modes. Cette étude du système proposé est basée sur la modélisation dynamique des convertisseurs Buck, Boost et Buck-Boost que nous avons déjà présenté au chapitre précédent, ainsi que sur la détermination de leurs fonctions de transfert que nous allons présenter dans ce chapitre. Le fonctionnement en mode charge et décharge sera fait selon la disponibilité de la source d'alimentation continue, ce choix peut être du a des conditions de disponibilité comme par exemple les panneaux solaires, ou nous pouvons avoir la tension uniquement le jour, pendant la nuit cette source ne sera pas disponible, ou bien, on peut avoir la source ou pas pour d'autre raisons de notre choix ou imposés.

Le système a étudier est alors composé de source, convertisseur bidirectionnel, batterie au lithium-Ion et bien sur une charge, ce système sera commandé via des régulateurs PID qui veille sur le bon fonctionnement du système que se soit en mode charge (où le convertisseur bidirectionnel fonctionne comme un convertisseur Buck et la batterie reçoit de l'énergie) ou bien en mode décharge (où le convertisseur bidirectionnel fonctionne comme un convertisseur Boost pour alimenter la charge à partir de la batterie). Dans ce qui suit nous allons commencer par une présentation détaillée du système à étudier, [20].

III.2. Présentation du système de charge/décharge de batteries :

Les systèmes de charge/décharge des batteries à base de convertisseur bidirectionnel étudié est basés sur l'utilisation de ce type de convertisseur bidirectionnel (sachant que, il y a d'autre possibilité pour concevoir des systèmes de charge non réversibles) à la fois pour le mode de charge et le mode de décharge de la batterie au lithium-Ion. Les opérations de charge et de décharge seront contrôlées via des régulateurs PID qui veillent sur le bon fonctionnement du système. Dans le mode charge, le convertisseur bidirectionnel fonctionne comme un convertisseur Buck et alimente la batterie, et dans ce cas la tension et le courant de la batterie seront contrôlé jusqu'à la saturation. Pour le mode décharge, le convertisseur bidirectionnel fonctionne comme un convertisseur Boost pour alimenter la charge à partir de la batterie, et dans ce cas, le courant de la batterie en plus de la tension de la charge, cette fois, seront contrôlés afin de garantir les conditions qu'exige la charge, en terme de tension d'alimentation qui doit être constante (ou variable, selon les conditions d'utilisation) et en courant nécessaire pour accomplir la tâche que la charge assure (motorisation, pompage, éclairage, ou alimentation de autres systèmes).

La figure suivante donne le principe et les éléments qui constituent un système réversible de charge/décharge d'une batterie, bien sûr, l'alimentation d'une charge le maximum temps est l'objectif final, ce qui rend l'utilisation de la batterie pour emmagasiner de l'énergie important.

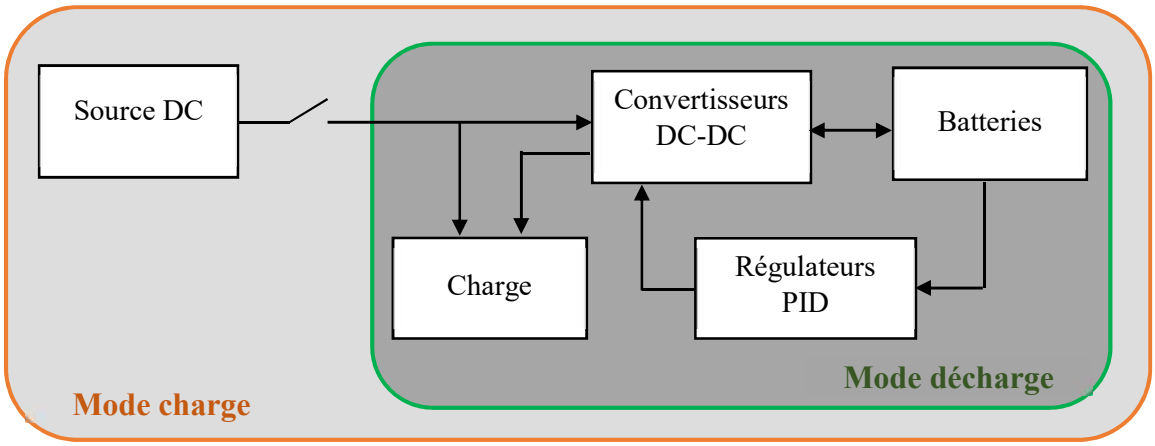


Figure III.1. Schéma principale de système de charge/décharge des batteries.

Le fonctionnement de ce système s'effectue en deux modes comme nous avons déjà dit :

Mode charge : En mode charge, l'énergie est transférée de la source vers la batterie à travers le convertisseur DC-DC (bidirectionnel). Le régulateur PID contrôle la tension et le courant de charge afin d'assurer des opérations de charge stable, efficace et sécuriser de la batterie.

Mode décharge : Dans ce mode la batterie fournit de l'énergie au système et à la charge en fin. Le convertisseur DC-DC bidirectionnel fonctionne dans le sens inverse pour contrôler le transfert d'énergie, tandis que le régulateur PID maintient les paramètres électriques à leurs valeurs de référence, il s'agit de la tension de la charge et le courant en provenance de la batterie.

Dans le chapitre précédent, nous avons fait des présentations détaillées des batteries au Lithium-Ion (le type que nous avons utilisé) et des convertisseurs que se soit de type non réversible ou réversible. On a étudié les conditions de charge et l'état de charge de la batterie (SOC) et on a vue ses variations, ainsi que celles de la tension et du courant de batterie, bien sur la batterie est alimenté à l'aide d'un convertisseur bidirectionnel (qui fonctionne en mode Buck), les principaux types des convertisseurs ont été présentés, notamment le convertisseur Buck, le convertisseur Boost, le convertisseur Buck-Boost ainsi que le convertisseur réversible (bidirectionnel), leurs principes de fonctionnement et leurs caractéristiques, cette étude a permis de justifier le choix du convertisseur bidirectionnel utiliser dans notre système de charge et de décharge de la batterie.

La partie importante que reste à détailler c'est la stratégie de commande des différentes grandeurs. Pour cela on va réserver la section suivante pour détailler la conception de régulateurs pour les différents convertisseurs DC-DC.

III.3. Stratégie de commande des convertisseurs DC-DC :

Afin d'assurer une régulation efficace de la tension de sortie, une stratégie de commande des hacheurs qui permettre de contrôler la tension et le courant de sortie en boucle fermée utilisant un régulateur PID est adoptée. Le principe consiste à comparer en permanence la tension de sortie avec la tension de référence afin de générer un signal d'erreur. Ce dernier est traité par le régulateur PID qui ajuste automatiquement le rapport cyclique d du convertisseur pour maintenir une tension stable et réduire l'erreur statique.

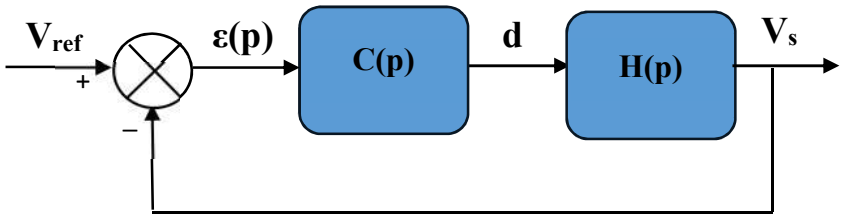


Figure III.2 : Schéma de principe d'une boucle fermée à base d'un PID.

La mise en œuvre des stratégies de commande nécessite une bonne compréhension des différentes structures de hacheurs. Ainsi, nous présentons dans ce qui suit les principaux types de convertisseurs avec étude de modélisations fréquentielles et conceptions des régulateurs PID.

Rappelant que l'objectif principal est de concevoir des boucles fermées capables d'obtenir des réponses rapides avec des faibles erreurs statiques et stables en régimes permanents. Les résultats de simulation que nous comptant faire dans la suite permettent ainsi d'évaluer le comportement dynamique de chaque convertisseur et de valider la stratégie de commande adoptée.[20]

III.3.1. Régulateur PID pour convertisseurs abaisseurs, Buck :

Pour commander un hacheur Buck, il faut trouver sa fonction de transfert $H(p)$, une fois obtenue, elle sera utilisée afin de déterminer les paramètres du régulateur PID. Cette approche permet de représenter le comportement dynamique du convertisseur en boucle fermée et d'améliorer la précision de la régulation de la tension de sortie.[20] On va utiliser les équations différentielles obtenues dans le chapitre précédent $(\text{équations II.5 et II.6})$, de courant et de tension, pour calculer d'abord la fonction de transfert en boucle ouvert :

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L}V_c(t) + \frac{d}{L}U_1(t)$$

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{C}i_L(t) - \frac{1}{RC}V_c$$

A partir de la deuxième équation, on peut écrire :

$$i_L = \frac{1}{RC}V_c + C\frac{dv_c}{dt} \qquad (III.1)$$

$$C\frac{d^2v_c}{dt^2} + \frac{1}{R}\frac{dv_c}{dt} + \frac{1}{L}v_c(t) = \frac{d}{L}U(t)$$

$$\left(LCP^2 + \frac{L}{R}P + 1\right)V_c(p) = dU(p)$$

Alors, on peut trouver la fonction du transfert suivante :

$$H(p) = \frac{v_c(p)}{U_1(p)} = \frac{d}{LCP^2 + \frac{1}{R}P + 1} \qquad (III.2)$$

Avant de simuler le convertisseur en boucle fermé on doit estimer les paramètres du régulateur PID par la méthode automatique qui nécessite la fonction du transfert :

$$H(p) = \frac{v_c(p)}{d(p)} = \frac{U_1(p)}{LCP^2 + \frac{L}{R}P + 1} \qquad (III.3)$$

D'après la structure du régulateur PID donné précédemment, on peut redonner une boucle fermée destiné au convertisseur Buck :[21]

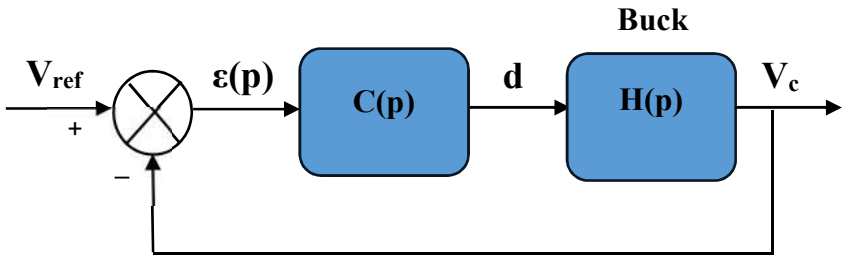


Figure III.3: Schéma général de la commande PID en boucle fermée d'un convertisseur Buck.

Il faut calculer les paramètres de la fonction de transfert *C(p)* du régulateur PID, pour ce faire il faut calculer la fonction de transfert en boucle fermé $H_{BF}(p)$, et pour le calcul de cette dernière il faut trouver d'abord la fonction de transfert en boucle ouverte $H_{BO}(p)$. La fonction de transfert d'un régulateur PID est donnée par :

$$C(p)=K_p\left(1+\frac{1}{\tau_i P}+\tau_d P\right) \qquad (III.4)$$

A partir des équations (III.3) et (III.4), la fonction du transfert en boucle ouverte H_{Bo} est donnée comme suit :

$$\begin{aligned} H_{BO}(p) &= C(p).H(p) \\ &= K_p\left(\frac{\tau_i\tau_d P^2+\tau_i P+1}{\tau_i P}\right)\left(\frac{U(p)}{LCP^2+\frac{L}{R}P+1}\right) \end{aligned} \qquad (III.5)$$

D'après l'équation $(III.5)$ on peut déduire que la fonction de transfert $H_{BO}(p)$ obtenue est d'ordre trois, ce qui va donner une fonction de transfert en boucle fermée d'ordre trois, pour éviter cela il faut imposer le choix des paramètres suivant :

$$\tau_i\tau_d = LC \quad , \quad \tau_i = \frac{L}{R} \quad , \quad \tau_d = RC$$

Ce choix permet de simplifier l'équation (III.5), elle devient comme suit :

$$\begin{aligned} H_{BO}(p) &= C(p).H(p) \\ &= K_p\left(\frac{U_1}{\tau_i P}\right) \end{aligned} \qquad (III.6)$$

Maintenant, nous avons une fonction de transfert $H_{BO}(p)$ d'ordre un (du premier ordre). Ce qui va donner une fonction de transfert en boucle fermée $H_{BF}(p)$ du premier ordre. A partir du schéma de la boucle fermée donné précédemment (figure III.3), on peut calculer la fonction de transfert $H_{BF}(p)$, elle est déterminée comme suit :

$$H_{BF}(P)=\frac{K_p U_1}{\tau_i P+K_p U_1}=\frac{1}{\frac{\tau_i}{K_p U_1}P+1} \qquad (III.7)$$

La fonction de transfert (III.7) est sous la forme canonique d'un système du premier ordre avec un gain statique égale à un et une constante de temps donnée par :

$$\theta=\frac{\tau_i}{K_p U_1} \qquad (III.8)$$

On remplace τ_i par sa valeur ($\tau_i=\frac{L}{R}$), on obtient alors :

$$\theta = \frac{L}{K_p U_1 R}$$

Le dernier paramètre (gain proportionnel) du régulateur est, alors, donné comme suit :

$$K_p = \frac{L}{\theta U_1 R} \qquad (\text{III.9})$$

Exemple de simulation :

Dans cet exemple de simulation, nous appliquons un modèle de convertisseur en utilisant les paramètres suivants : une tension d'entrée $U_{entrée} = 80V$, et une résistance $R = 0.72\Omega$, une inductance $L = 0.0279H$ et une capacité $C = 6.9444 \times 10^{-5} F$.

La tension de sortie du convertisseur sera alors une sortie obtenue par la boucle fermée, c'est-à-dire, il suffit de donner une tension de référence, est le régulateur assure la convergence de la sorte vers cette référence. Les paramètres du régulateur sont alors déterminés comme donné précédemment, on trouve :

$$\tau_i \tau_d = LC = 1.937 \times 10^{-6}$$

$$\tau_i = \frac{L}{R} = 0.0387$$

$$\tau_d = RC = 4.99 \times 10^{-5}$$

$$K_p = 0.0161$$

Après la détermination des paramètres du régulateur PID, une simulation du système, donné par les caractéristiques en haut, est réalisée afin d'évaluer les performances de la boucle de réglage PID du convertisseur Buck en termes de suivi de la référence et d'analyser son comportement en régime transitoire et permanent.

On obtient les résultats de Simulation représentés sur les figures (III.4) et (III.5), la figure (III.4) représente l'évolution simultanée du rapport cyclique d, la tension de sortie Vc et le courant de l'inductance IL. Au début de la simulation, le régulateur PID agit sur le rapport cyclique afin de réduire progressivement l'erreur entre la tension de référence et la tension de sortie.

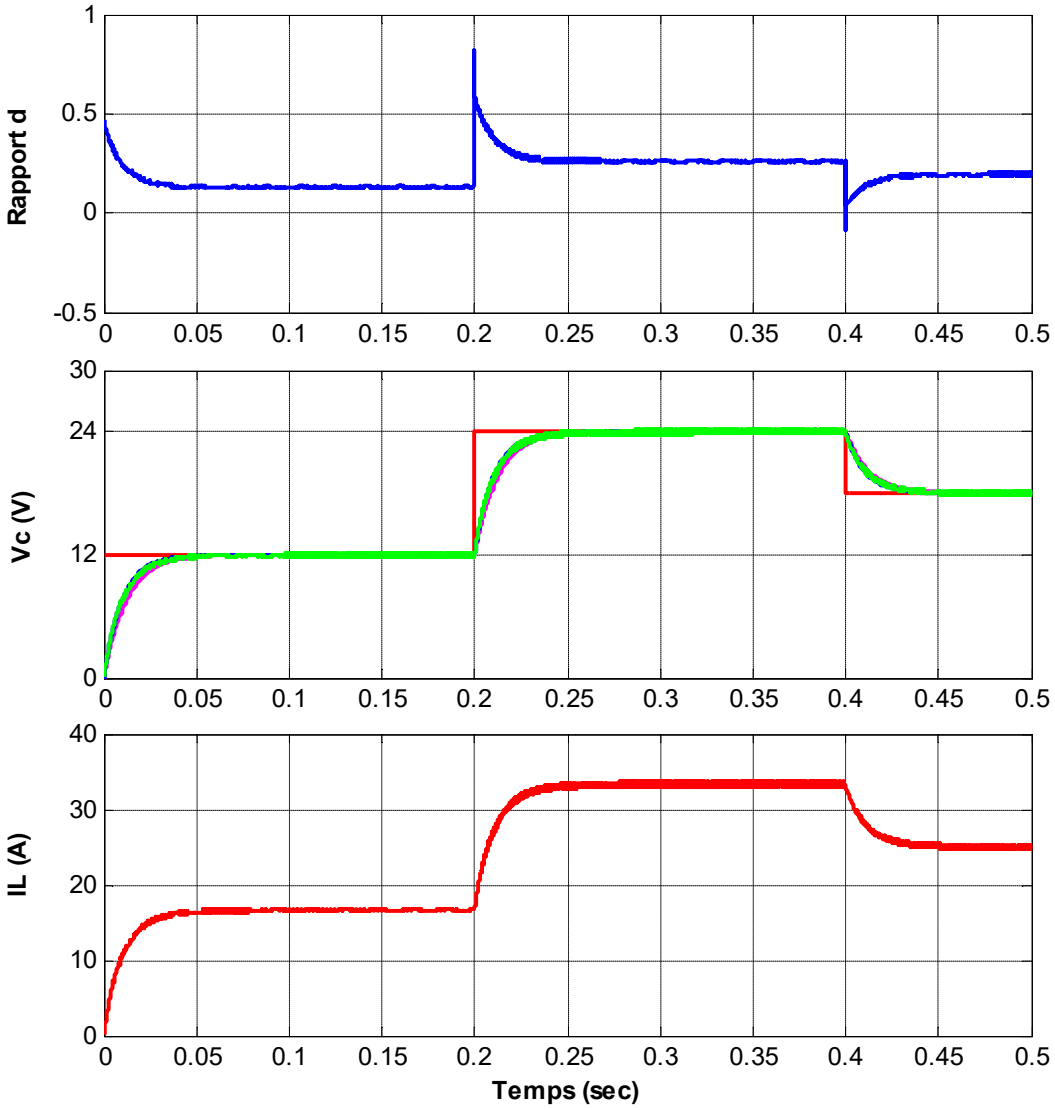


Figure III.4 : Évolution du rapport cyclique, de la tension de sortie et du courant de l'inductance du convertisseur Buck sous commande PID.

On a fait la régulation avec trois modèles, les résultats sont représentés dans le même schéma, c-à-dire, en utilisant la fonction de transfert, les équations différentielles, et le schéma bloc de Simulink. Les résultats obtenus sont identiques, donc le système de réglage fonctionne correctement et assure les performances dans des bonnes conditions et en confirment ainsi la qualité de la commande proposée et sa capacité à maintenir une tension stable malgré les variations de la référence, considérée comme entrée au système bouclé, et que le régulateur PID assure une régulation efficace, avec un comportement stable et avec une erreur statique pratiquement nulle.

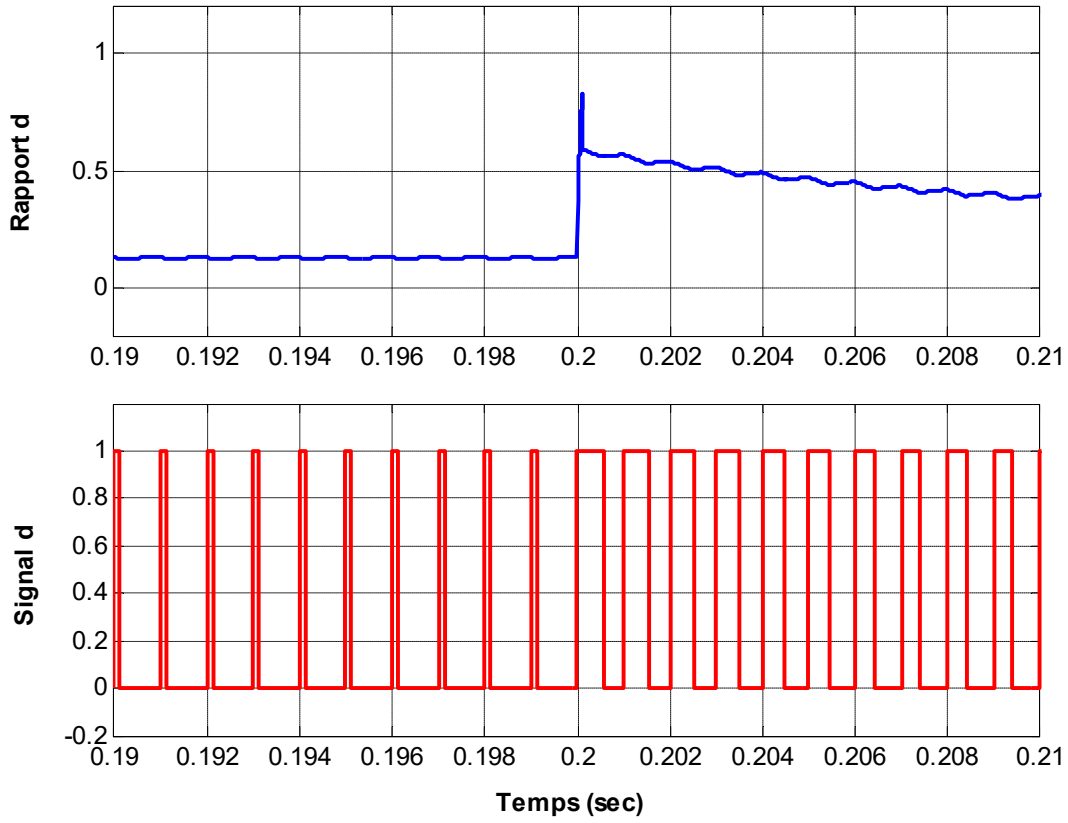


Figure III.5 : Évolution du rapport cyclique et du signal de commande du convertisseur Buck sous régulation PID.

La figure II.5 représente le signal de commande (zoom sur l'instant 0.2 sec) généré par le régulateur PID. Au début de la simulation, le rapport cyclique d présente une variation rapide correspondant à la phase de correction de l'erreur entre la tension réelle et la tension de référence. À mesure que cette erreur diminue, le régulateur réduit progressivement son action jusqu'à ce qu'à où le rapport cyclique atteint une valeur constante (le rapport d). Cette stabilisation traduit l'établissement du régime permanent et confirme que la tension de sortie est correctement régulée. L'absence d'oscillations importantes et la convergence rapide du signal de sortie sous l'action du signal de commande démontrent la robustesse du régulateur PID ainsi que sa capacité à assurer une réponse dynamique rapide tout en garantissant la stabilité du convertisseur Buck.

III.3.2. Régulateur PID pour les convertisseurs élévateurs, Boost :

Pour commander un hacheur Boost, il est nécessaire d'abord de déterminer la fonction de transfert du convertisseur afin de déterminer les paramètres du régulateur PID. Étant donné que la modélisation de ce convertisseur est présentée au chapitre précédent, [21] le système présente une dynamique relativement complexe, mais décrite par les équations II.14 et II.15. On peut écrire :

$$\frac{C}{1-d}\frac{d^2v_c}{dt^2}+\frac{1}{R(1-d)}\frac{dv_c}{dt}+\frac{1-d}{L}V_c=\frac{1}{L}U$$

$$\frac{LC}{1-d}\frac{d^2v_c}{dt^2}+\frac{L}{R(1-d)}\frac{dv_c}{dt}+(1-d)V_c=U$$

$$\left(\frac{LC}{1-d}P^2+\frac{L}{R(1-d)}P+(1-d)\right)V_c(P)=U(P)$$

$$\left(LCP^2+\frac{L}{R}P+(1-d)^2\right)V_c(P)=(1-d)U(P)$$

Apres quelque manipulation, on peut trouver la fonction du transfert suivante :

$$H(p)=\frac{U(p)}{V_c}=\frac{1-d}{LCP^2+\frac{L}{R}P+(1-d)^2} \qquad (\text{III.10})$$

Si nous souhaitons mettre la fonction de transfert précédente sous la forme canonique, il est clair qu'on va trouver un gain statique égal à $\frac{1}{1-d}$, ce qui correspond a celui de l'équation II.23.

D'après la structure du régulateur PID donné précédemment par la figure III.2, on peut donner une boucle fermée destiné au convertisseur élévateur Boost :

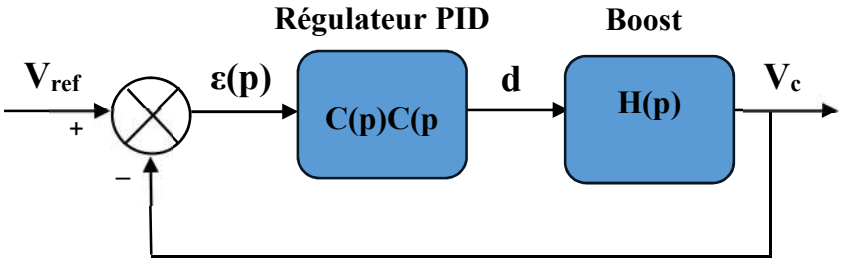


Figure III.6: Schéma général de la commande PID en boucle fermée du convertisseur Boost.

Pour trouver les paramètres du régulateur PID, c'est-à-dire les paramètres de la fonction de transfert du régulateur *C(p)*, ils existent plusieurs méthodes, nous pouvons utiliser la méthode précédente utilisé pour la détermination du régulateur PID du convertisseur Buck, il suffit de refaire les mêmes étapes. Mais dans notre, nous avons préféré d'utiliser une autre méthode, qui

conduit à la détermination des paramètres du régulateur PID en question. C'est juste pour présenter une autre méthode, mais pas parce qu'elle donne des résultats meilleurs. La méthode utilisée et celle de Ziegler-Nichols pour les systèmes en boucle fermée. Dans ce qui suit, on va donner le principe de cette méthode.

Principe de la méthode de Ziegler-Nichols en boucle fermé

Ziegler-Nichols ont proposé deux approches heuristiques basées sur des expériences pour ajuster rapidement les paramètres des régulateurs P, PI et PID, [22]. La première méthode nécessite l'enregistrement de la réponse indicielle en boucle ouverte, alors que la deuxième demande d'amener le système bouclé à sa limite de stabilité elle est appelée la **Méthode du point critique,** Cette méthode est basée sur la connaissance du point critique du processus. Expérimentalement, on boucle le processus sur un simple régulateur proportionnel (les deux actions, intégrale et dérivé, ne sont pas utilisés), voir la figure suivante :

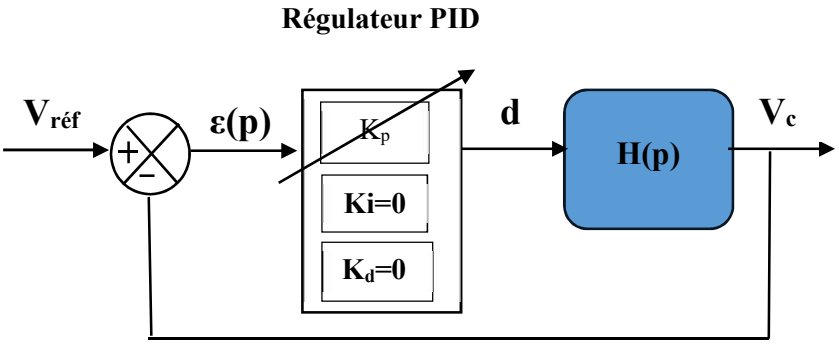


Figure III.7: Schéma général de la commande PID en boucle fermée du convertisseur Boost.

Ensuite, en augmentant le gain jusqu'à amener le système à osciller de manière permanente ; on se trouve ainsi à la limite de stabilité. Après avoir relevé le gain critique K_{cr} du régulateur et la période d'oscillation P_{cr} de la réponse, nous pouvons calculer les paramètres du régulateur choisi à l'aide du tableau III.1. Ici et en exemple au-dessous, les valeurs proposées conduisent à un temps de montée relativement court malheureusement et à un dépassement élevé un peu. Cette situation n'étant pas toujours satisfaisante, on peut être amené à corriger les coefficients proposés et, en particulier, à diminuer le gain proportionnel K_p.

Tab.III.1 : Paramètres du régulateur PID à définir à partir des paramètres du point critique.

Type de Contrôleur	K_p	τ_i	τ_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{1.2}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5K_{cr}$	$0.125K_{cr}$

Exemple de simulation :

Dans cet exemple de simulation, nous utilisons le convertisseur caractérisé par les paramètres suivants : une tension d'entrée (entrée du Boost) $U_{entrée} = 14V$, une résistance $R = 10\Omega$, une inductance $\mathrm{L} = 19.53\mathrm{e}-6\mathrm{H}$ et une capacité $\mathrm{C} = 25\mathrm{e}-6\mathrm{F}$. La tension de sortie est donnée par une référence ou une valeur désirée.

Et après avoir appliqué la méthode de Ziegler-Nichols, on a obtenu alors les valeurs nécessaires pour le régulateur, on trouve après le test :

$$K_{cr} = 1.5 \quad ; \quad P_{cr} = 0.12ms = 0.00012s$$

Ce qui donne si nous utilisons un régulateur PI :

$$K_p = 0.45 \times K_{cr} = 0.675 \quad ; \quad \tau_i = \frac{P_{cr}}{1.2} = 6750 \quad ; \quad \tau_d = 0$$

La première courbe de la figure III.8 présente l'évolution du rapport cyclique, sur la deuxième la tension d'entrée et la tension de sortie, ainsi que le courant circulant dans l'inductance. Nous avons supposé que la tension d'entrée soit constante et comme cité en haut 14V, et celle de la sortie suit la référence que nous avons choisis (20V ensuite 16V Brusquement) ce qui confirme le fonctionnement normal de la boucle fermée, un régulateur PI pour l'hacheur Boost (en mode élévateur). Au cours de cette phase provisoire, le courant de l'inductance augmente progressivement et proportionnellement afin d'assurer le transfert d'énergie vers la charge.
Une fois la tension de référence atteinte, le rapport cyclique devient pratiquement constant, la tension de sortie se stabilise et le courant de l'inductance atteint également une valeur permanente. Cette évolution simultanée des différentes grandeurs électriques traduit une bonne coordination entre la commande PID et le fonctionnement du convertisseur.

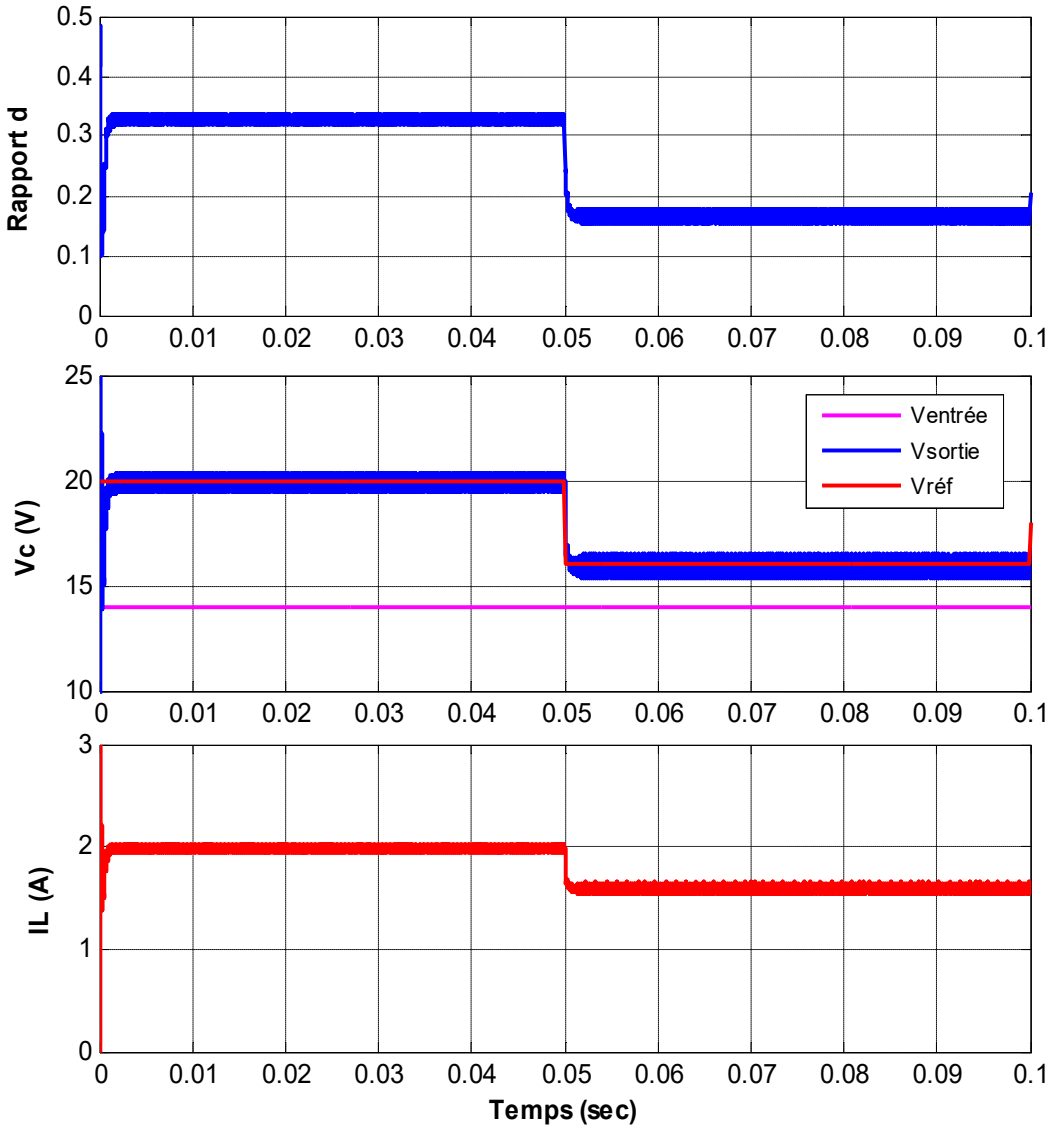


Figure III.8 : Évolution du rapport cyclique, de la tension d'entrée, de la tension de sortie et du courant de l'inductance du convertisseur Boost sous commande PID.

La figure III.8 représente le signal de commande appliqué au convertisseur Boost. Au démarrage, le régulateur PID génère une variation rapide du rapport cyclique afin de réduire l'erreur entre la tension de référence et la tension réelle.

Cette phase correspond au régime transitoire pendant lequel le convertisseur ajuste progressivement son fonctionnement jusqu'à atteindre les conditions optimales de régulation. Au fur et à mesure que l'erreur diminue, le signal de commande converge vers une valeur stable, garantissant ainsi le maintien de la tension de sortie autour de la valeur de référence.

L'absence de fluctuations importantes après la phase transitoire démontre la robustesse du régulateur PID et sa capacité à assurer une commande précise du convertisseur. Cette stabilité améliore les performances globales du système et permet une alimentation fiable de la charge dans différentes conditions de fonctionnement.

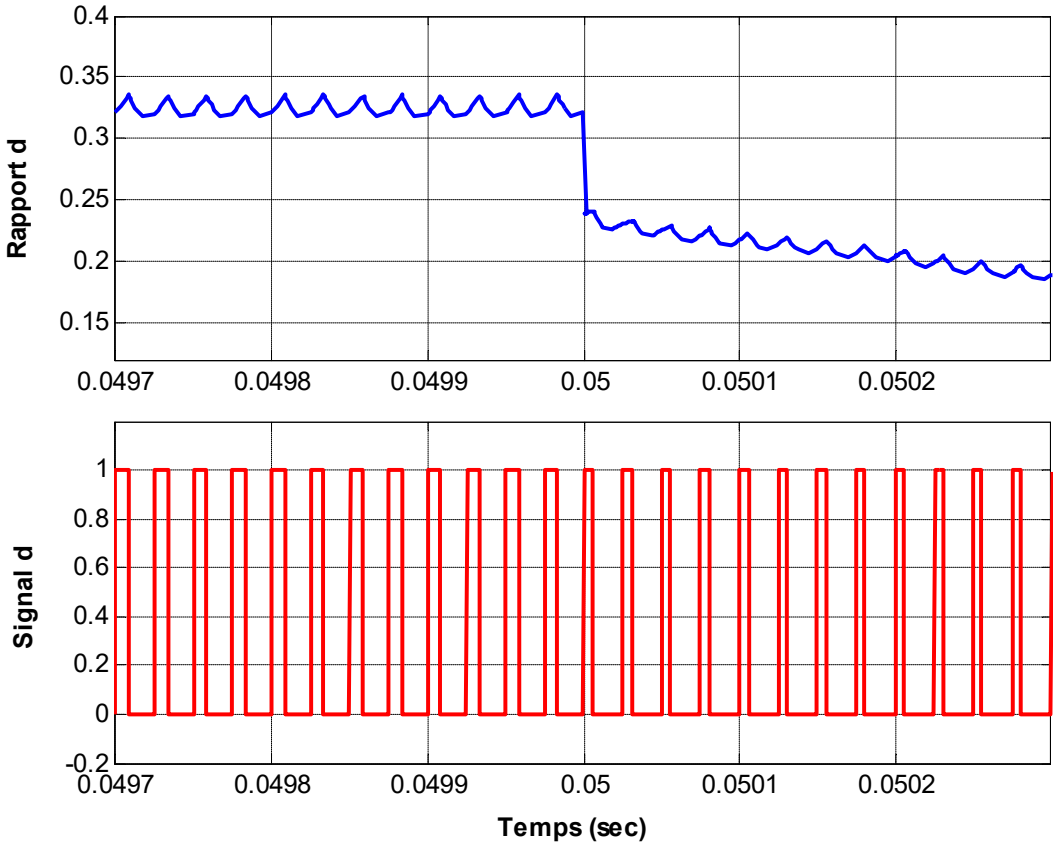


Figure III.9 : Évolution du signal de commande du convertisseur Boost sous régulation PID.

III.3.3. Régulateur PID pour le convertisseur Buck-Boost :

Pour commander un hacheur Buck-Boost en boucle fermée en utilisant un régulateur PID, il est nécessaire de commencer par trouver la fonction de transfert à commander en fonction du rapport cyclique **d**.[20] Ensuite, il faut estimer les paramètres, K_p K_i K_d du régulateur encore une fois à l'aide de la méthode de Ziegler-Nichols, ce qui nous permet d'obtenir les paramètres du régulateur d'une manière simple et comme nous avons déjà vues, ils donnent des bons résultats. A partir des équations du convertisseur abaisseur-élévateurs donnés au chapitre II précédent et la figure (III.2), nous devons rechercher les fonctions de transferts H(p) et C(p) du convertisseur et du régulateur. On obtient à partir des équations II.21 et II.22, on écrit :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1-d}{L} V_c + \frac{d}{L} U \qquad \text{(III.11)}$$

$$\frac{dv_c}{dt} = -\frac{1-d}{L} i_L - \frac{1}{RC} V_c \qquad (III.12)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} V_c - \frac{d}{L} V_c + \frac{d}{L} U$$

$$\frac{dv_c}{dt} = -\frac{1}{C} i_L - \frac{d}{L} i_L - \frac{1}{RC} V_c$$

$$H(p) = \frac{V_c}{U} \qquad (III.13)$$

$$i_L = -\frac{C}{1-d}\frac{dv_c}{dt} - \frac{1}{R(1-d)} V_c$$

$$= -\frac{1}{1-d}\left(-C.V_c - \frac{1}{R} V_c\right)$$

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} = -\frac{1}{1-d}\left(-C.\frac{d^2 v_c}{dt^2} - \frac{1}{R}\frac{dv_c}{dt}\right) \qquad (III.14)$$

D'après l'équation (III.14) :

$$-\frac{1}{1-d}\left(-C.\frac{d^2 v_c}{dt^2} - \frac{1}{R}\frac{dv_c}{dt}\right) = \frac{1-d}{L} V_c + \frac{d}{L} U$$

$$-\frac{C}{1-d}\frac{d^2 v_c}{dt^2}\frac{1}{R(1-d)}\frac{dv_c}{dt} + \frac{1-d}{L} V_c = \frac{d}{L} U$$

$$H(p) = \frac{\frac{d}{L}}{-\frac{C}{1-d} P^2 \quad \frac{1}{R(1-d)} P + \frac{1-d}{L}} = \frac{d}{-\frac{CL}{1-d} P^2 \quad \frac{L}{R(1-d)} P + 1 - d} \qquad (III.15)$$

A la fin on trouve notre fonction du transfert en fonction du rapport cyclique :

$$H(p) = \frac{-d}{\frac{LC}{(1-d)} P^2 \quad \frac{L}{(1-d)} P - (1-d)} \qquad (III.16)$$

Si nous souhaitons mettre la fonction de transfert précédente sous la forme canonique, il est clair qu'on va trouver un gain statique égal à $\frac{d}{1-d}$, ce qui correspond cette fois-ci à celui de l'équation II.16.

III.3.1.3. Exemple de simulation :

Dans cet exemple de simulation, nous appliquons le modèle de convertisseur en utilisant les paramètres suivants : une tension d'entrée $U_{entrée} = 100V$, une résistance $R = 10\Omega$, une inductance $\mathrm{L} = 19.53\mathrm{e}-6\mathrm{H}$,une capacité $\mathrm{C} = 25\mathrm{e}-6\mathrm{F}$ et la fréquence $f = 5000Hz$.

Après le calcul des gains du régulateur PID (on a utilisé les paramètres $K_p = 0.02$ et $\tau_i = 1$), une simulation est réalisée afin d'évaluer le comportement du convertisseur dans les deux modes de fonctionnement : mode Buck (abaisseur) et mode Boost (élévateur). Les résultats obtenus sont présentés dans la figure suivante :

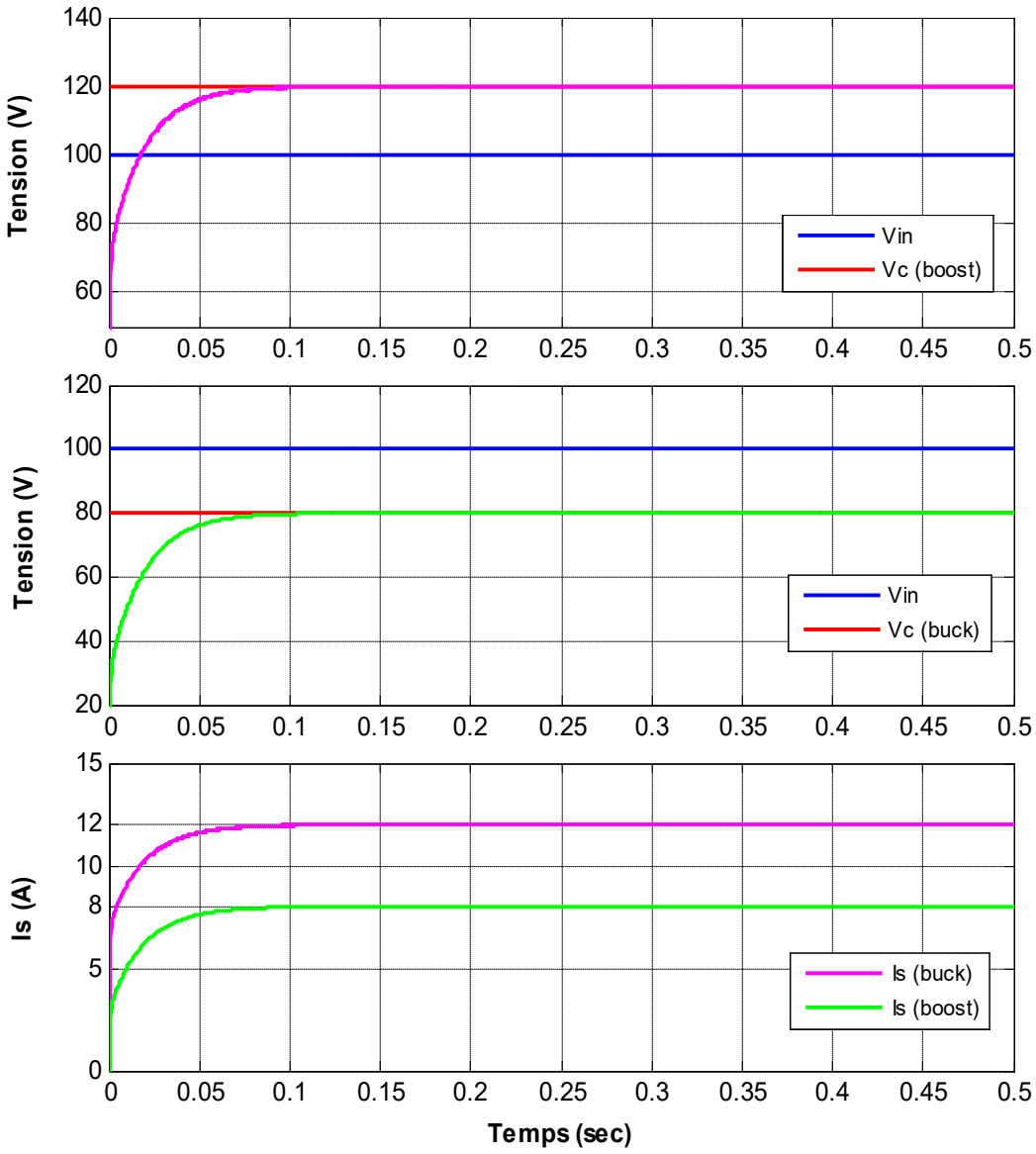


Figure III.10 : Évolution des tensions et des courants du convertisseur Buck-Boost sous commande PID.

La figure III.10 présente l'évolution des tensions d'entrée, des tensions de sortie ainsi que des courants obtenus pour les modes Buck et Boost. Les différentes courbes mettent en évidence la capacité du convertisseur à assurer automatiquement l'abaissement ou l'élévation de la tension selon les besoins du système.

Lorsque la tension d'entrée est supérieure à la tension de référence, le convertisseur fonctionne en mode Buck et réduit progressivement la tension jusqu'à atteindre la valeur désirée. À l'inverse, lorsque la tension d'entrée devient inférieure à la tension de référence, le convertisseur passe en mode Boost afin d'augmenter la tension de sortie et de maintenir une alimentation constante.

Les courants de sortie évoluent simultanément avec les tensions. Une augmentation du courant est observée durant le régime transitoire afin de répondre à la demande énergétique de la charge, puis celui-ci se stabilise dès que la tension atteint sa valeur de référence. Cette évolution traduit un bon transfert de puissance et un fonctionnement stable du convertisseur. Les courants sont en opposant avec la tension c-à-dire lorsqu'en fonctionne en mode Buck le courant augmente et en mode boost le courant diminue.

L'action du régulateur PID permet de corriger rapidement l'erreur de régulation en ajustant automatiquement le rapport cyclique. Cette correction assure un suivi précis de la consigne, une faible erreur statique et une excellente stabilité en régime permanent. L'absence d'oscillations importantes confirme la robustesse de la stratégie de commande adoptée.

Ces résultats démontrent que le convertisseur Buck-Boost est capable d'assurer efficacement les fonctions d'abaissement et d'élévation de tension tout en garantissant une alimentation stable de la charge et une bonne qualité de régulation.

III.4. Commande d'un système de charge et de décharge d'une batterie :

Après l'étude et la commande des différents convertisseurs présentées dans les sections précédentes, nous nous intéressons dans cette partie à la commande d'un système complet de charge et de décharge d'une batterie. L'utilisation d'un convertisseur bidirectionnel permet d'assurer un échange d'énergie dans les deux sens entre la batterie et le bus continu, ce qui est particulièrement important dans les systèmes de stockage d'énergie.

L'objectif principal de cette commande est de garantir un fonctionnement stable du système tout en assurant le suivi des consignes de tension et de courant. Pour cela, une stratégie de régulation

adaptée est mise en œuvre afin de contrôler les échanges de puissance entre la batterie et le bus continu, aussi bien pendant la phase de charge que pendant la phase de décharge, [23].

III.4.1. Présentation du système :

La structure globale du système de charge et de décharge de la batterie basé sur un convertisseur bidirectionnel DC-DC. Ce système est constitué d'un bus continu coté source de tension (HV Bus), d'une batterie connectée au bus sur l'autre coté (LV Bus), d'une inductance de stockage d'énergie ainsi que de deux interrupteurs commandés permettant d'assurer le transfert de puissance dans les deux sens.

Le principe de fonctionnement dépend de l'état énergétique du système. Lorsque l'énergie disponible au niveau du bus continu est suffisante, le convertisseur assure la charge de la batterie. Dans ce cas, l'énergie est transférée du bus continu vers la batterie et le convertisseur fonctionne en mode abaisseur de tension **Buck**. La commande agit alors sur le convertisseur afin de maintenir la tension de charge à sa valeur de référence tout en limitant le courant injecté dans la batterie pour garantir une charge correcte et sécurisée, la figure suivante donne le principe, [14].

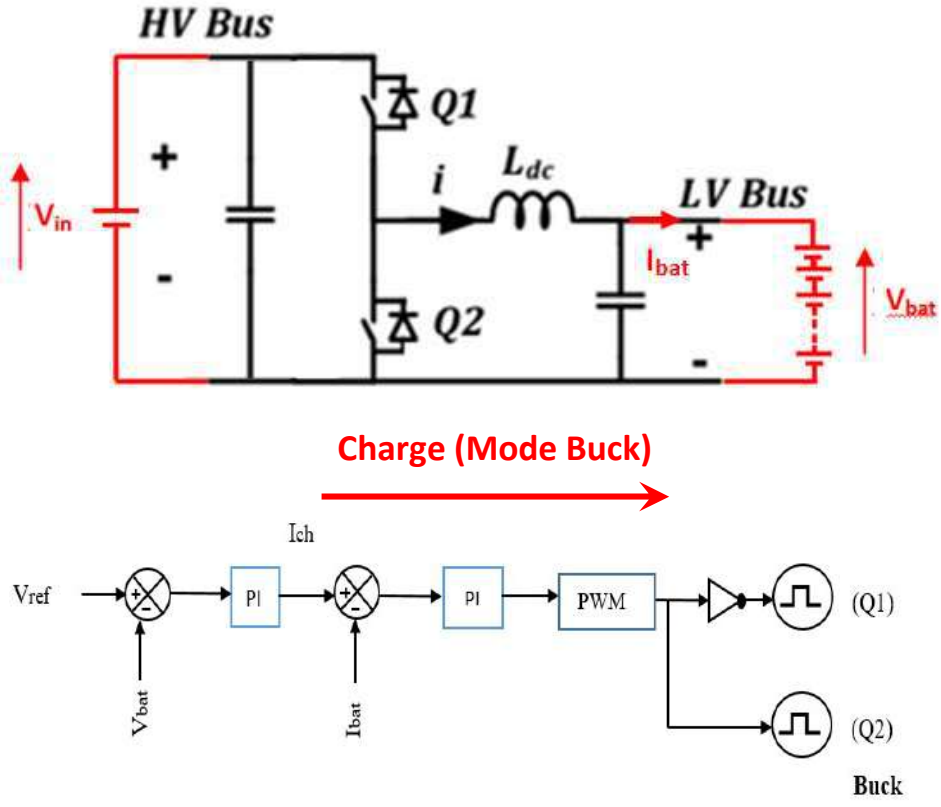


Figure III.11 : Structure globale du système de charge de la batterie.

En revanche, lorsque le système nécessite un apport d'énergie supplémentaire, la batterie fournit l'énergie stockée vers le bus continu. Dans cette situation, le convertisseur fonctionne en mode élévateur de tension **Boost** afin d'adapter la tension de la batterie au niveau requis par le bus continu. La commande permet alors de contrôler le courant de décharge et d'assurer le maintien de la tension du système dans les limites souhaitées, [14].

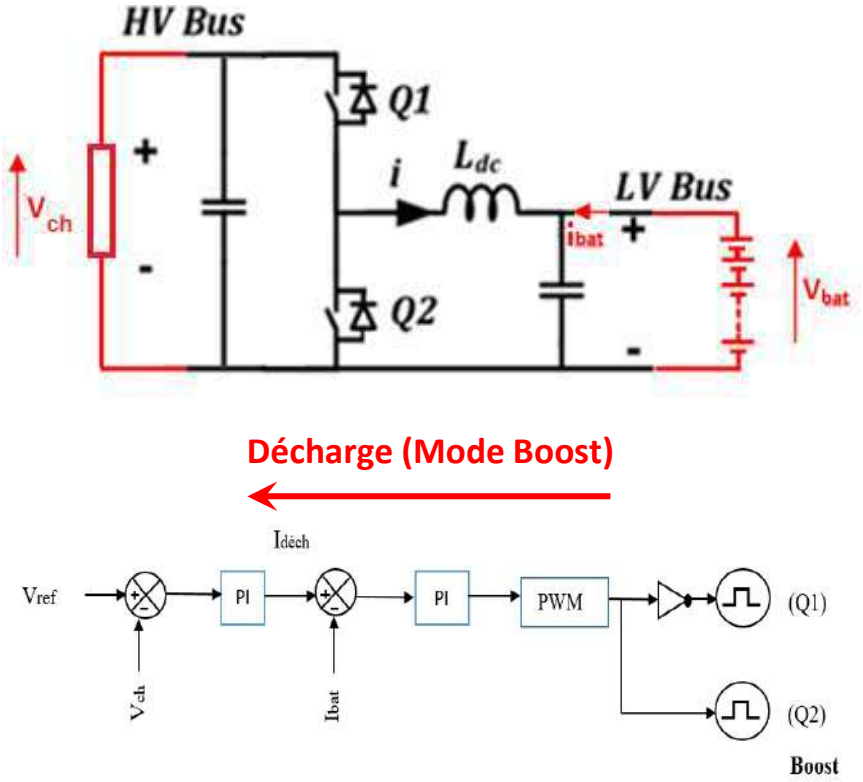


Figure III.12 : Structure globale du système de décharge de la batterie.

Dans notre travail, et afin d'obtenir des bonnes performances dynamiques, une structure de régulation à deux boucles est utilisée, nous avons procédé comme dans [10] et [14]. La boucle externe de tension compare la tension de référence à la tension mesurée et génère une consigne de courant. Cette consigne est ensuite utilisée par la boucle interne de courant qui assure un contrôle rapide et précis du courant circulant entre la batterie et le convertisseur. Cette stratégie permet d'améliorer la stabilité du système, de réduire l'erreur de régime permanent et de garantir un transfert d'énergie efficace dans les deux modes de fonctionnement. Grâce à cette architecture, le système est capable d'assurer automatiquement les opérations de charge et de décharge de la batterie tout en maintenant une bonne qualité de régulation et une gestion optimale de l'énergie.

Il est important de noter que pour les boucles de contrôle des tensions elles sont déduit de la première partie de ce chapitre, où nous avons détaillé les calculs des fonctions de transfert des

convertisseurs Buck et Boost, et les paramètres de la régulation des tensions pour les deux modes. Pour le réglage du courant de batterie, on a utilisé le même régulateur que nous avons utilisé dans la dernière section du chapitre deux. Pour le principe, le schéma de la boucle et la détermination des paramètres du régulateur nous avons travaillé comme présenté dans [10] et [14], on a donné le résumé en Annexes.

Sur la figure III.13 suivantes nous avons présenté le programme Simulink qui, à la fois, représente le mode de décharge et de charge de la batterie, il suffit d'actionner (avec 1 ou 0) le sélecteur (Ideal Switch), d'une manière manuelle ou automatique (nous avons inséré un step).

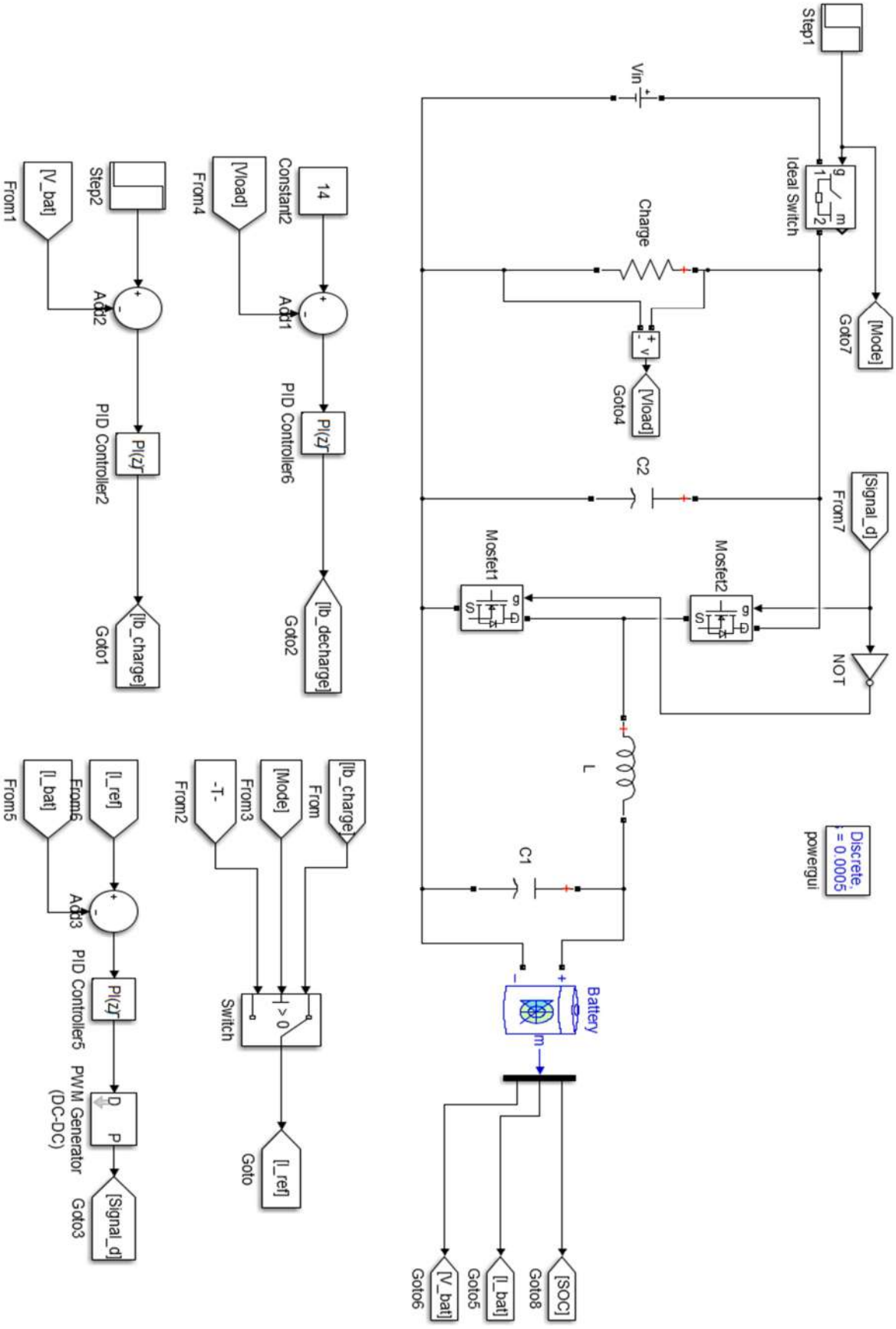


Figure III.13 : Schéma Simulink du système de charge/décharge de la batterie.

III.4.2. Simulation du système bouclé

En se basant sur les deux configurations données par les deux figures III.11 et figure III.12, pour le fonctionnement en mode charge et décharge. Nous allons effectuer une simulation sur Matlab/Simulink. Le choix de la batterie est important, elle doit être convenable avec le convertisseur bidirectionnel utilisé dont ses paramètres sont déterminés de la même manière que le dimensionnement des convertisseurs donné au chapitre II.

Les paramètres de la batterie que nous allons utiliser sont donné au tableau suivant :

TAB III.2. Caractéristiques du système convertisseur-batterie

Tension nominale de la batterie	Vbat=12 Volts
Tension de charge maximale de la batterie	$Vbat_{max}$=13.9 Volts
Courant de décharge nominal	In= 4.4A
Inductance du convertisseur	L=10mH
Capacité du convertisseur	C=100µf
Etat de charge initial	SOC(t0)=80%
Capacité nominale de la batterie	CN=10Ah

Avant de présenter les résultats et de voir et évaluer les performances du système bouclé (boucle de réglage, convertisseur bidirectionnel et batterie au Lithium-Ion) pour la charge et la décharge de la batterie, nous allons présenter d'abord les caractéristiques et les variables de la batterie choisi à travers les figures III.14 et III.15.

La première courbe de la figure III.14 montre la tension de décharge de la batterie V_{bat} qui correspond au courant de décharge nominale ($I_n = 4.4A$) sur la même figure nous avons présenté la zone et le temps de fonctionnement normal de la batterie (V_{bat} ne doit pas être inférieur à 12 V). De plus, nous avons montré la zone et le temps de fonctionnement exponentielle qui correspond au début de la décharge de batterie, il est à noter que cette zone ne peut pas être sauf dans le cas où la batterie est complètement chargée $\left(\text{l'état de charge est très proche de } SOC = 100\%\right)$ et la chute de la tension de batterie V_{bat} est très rapide pour cette zone. Sur la même figure nous avons montré la tension de la batterie pour différentes valeurs de courant de décharge I_{bat} , pour un courant de 1.5A, 3A et un grand courant de 15A. En remarque que les trois courbes gardent la même forme (courbe de tension de décharge d'une batterie au Li-Ion), mais, en remarque une

grande différence du point de vue rapidité de décharge, pour des petites valeurs du courant de décharge de la batterie en aura un temps de fonctionnement (de décharge) important, par contre si le courant est grand, le temps de décharge et de fonctionnement sera petit (sur la figure c'est la courbe en rouge qui correspond à $I_b = 15A$). Pour un utilisateur il est toujours préférable d'avoir un temps de fonctionnement maximale ; mais dans notre cas on préfère un courant de décharge suffisamment grand afin d'avoir un temps de calcule et de simulation rapide, pour cela il faut choisir une charge qui correspond à un courant important (15A dans notre simulation) et bien sur un temps minimal.

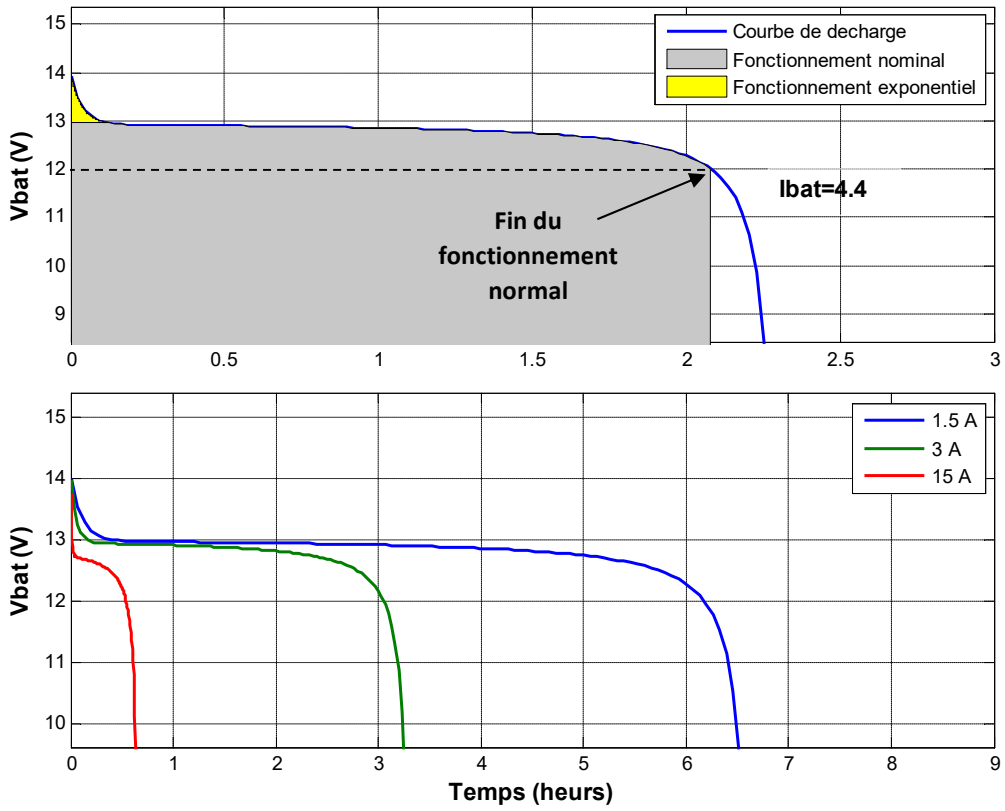


Figure III.14 : Tension de décharge de la batterie V_{bat}. (a) pour le courant nominale de décharge ($I_n = 4.4A$), (b) pour trois autres valeurs du courant I_{bat}.

La figure III.15 montre les mêmes variables (tensions de décharge) obtenues dans les mêmes conditions de fonctionnement (même courant de décharge), sauf que nous avons préféré de les montrer en fonction de capacité de la batterie en ampère heure (Ah).

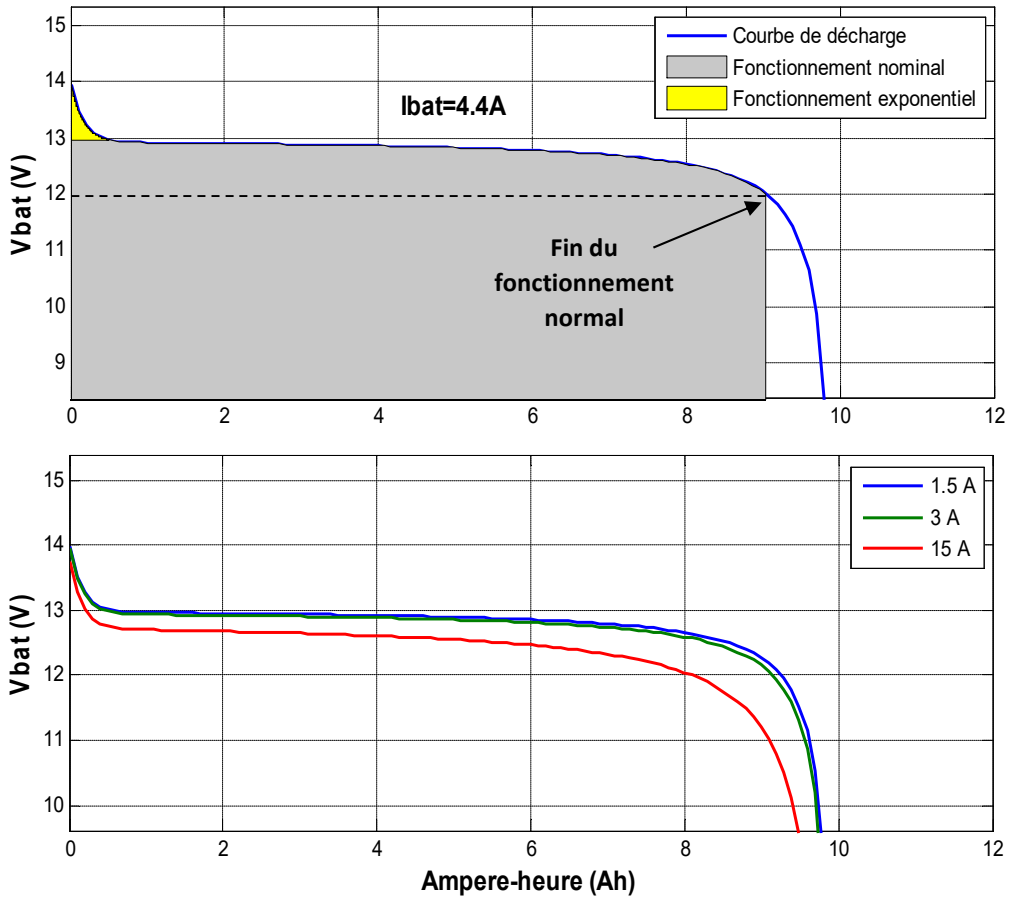


Figure III.15 : Tension de décharge de la batterie V_{bat} en fonction de la capacité CN.

Maintenant, en va donner les résultats de simulation du système en boucle fermée (boucle de réglage, convertisseur bidirectionnel et batterie au Lithium-Ion), ce système peut fonctionnée alors en deux mode, charge et décharge, et il doit alimenter une charge qui nécessite une tension de 14 volts (V_{ch}) en continue que ce soit en mode charge ou mode décharge.

Les figures III.16 et figure III.17 montrent les résultats de simulation. Sur la et figure III.16 on remarque l'état de charge SOC, le courant de décharge I_{bat} et la capacité spécifique de la batterie, alors que sur la figure III.17 on remarque l'évolution de la tension de décharge de la batterie V_{bat} , et sur la même figure, nous avons également représenté la tension de source (V_{in} considéré nulle ou non disponible en mode charge) ainsi que la tension de la charge V_{ch} . On observe que le courant de décharge (positif) reste pratiquement constant autour de 15 A durant la majeure partie de la simulation, ce qui entraîne une diminution progressive de la tension de la batterie au cours du temps. Malgré cette diminution, la tension de charge V_{ch} reste proche de sa valeur de référence

égale à 14 V pendant presque toute la durée de la simulation. Ce comportement confirme le bon fonctionnement du système de réglage du convertisseur bidirectionnel en mode Boost, qui compense la baisse progressive de la tension de la batterie afin d'assurer une alimentation stable de la charge. Lorsque la tension de la batterie atteint environ 12 V au cours de la décharge, une chute rapide apparaît dans la partie finale des courbes. Cette chute correspond à la zone de décharge profonde de la batterie, où l'énergie stockée devient insuffisante pour maintenir les conditions normales de fonctionnement, ce qui se traduit par une diminution du courant de décharge ainsi qu'une baisse de la tension de charge.

Sous l'effet de ce courant, de décharge, l'état de charge SOC diminue progressivement de 100 % jusqu'à une valeur proche de zéro, tandis que la capacité déchargée CN augmente continuellement jusqu'à atteindre la capacité nominale de la batterie (où la batterie sera vide).

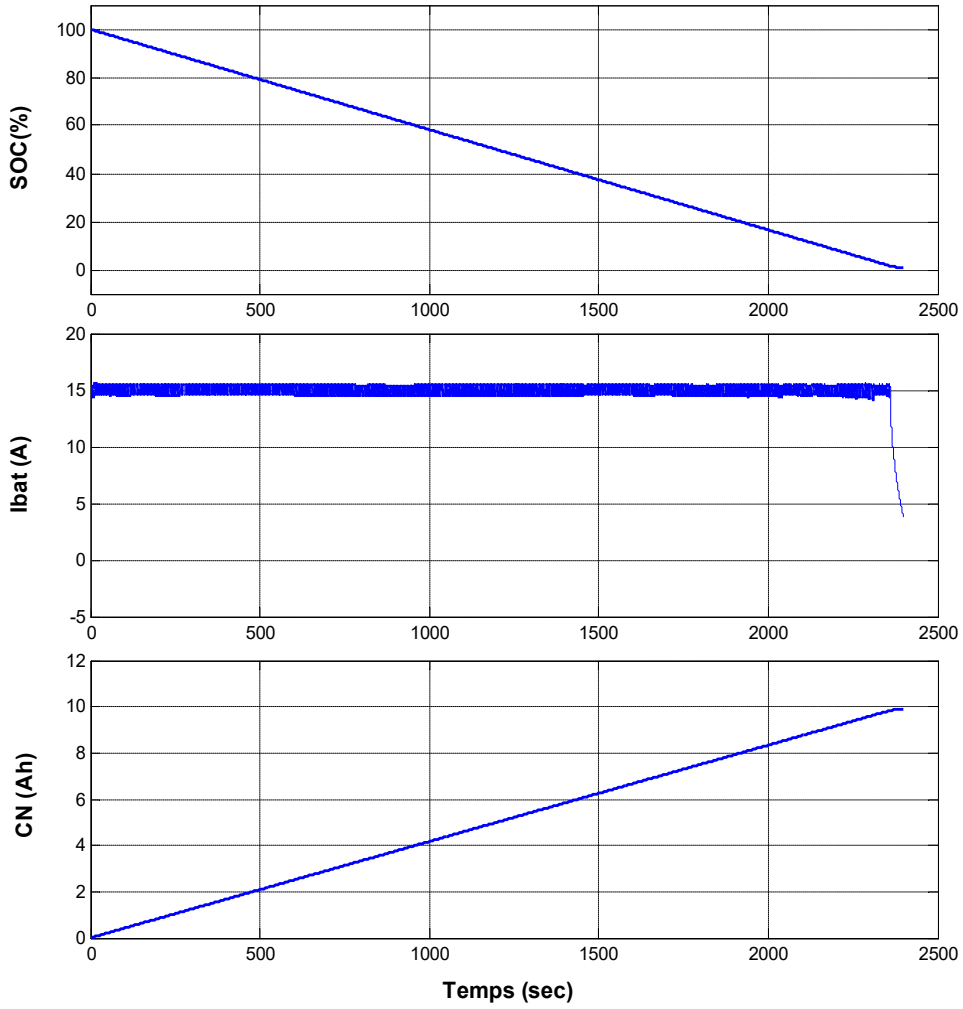


Figure III.16 : évaluation de l'état de charge (SOC), le courant de la batterie (I_{bat}), et la capacité (CN).

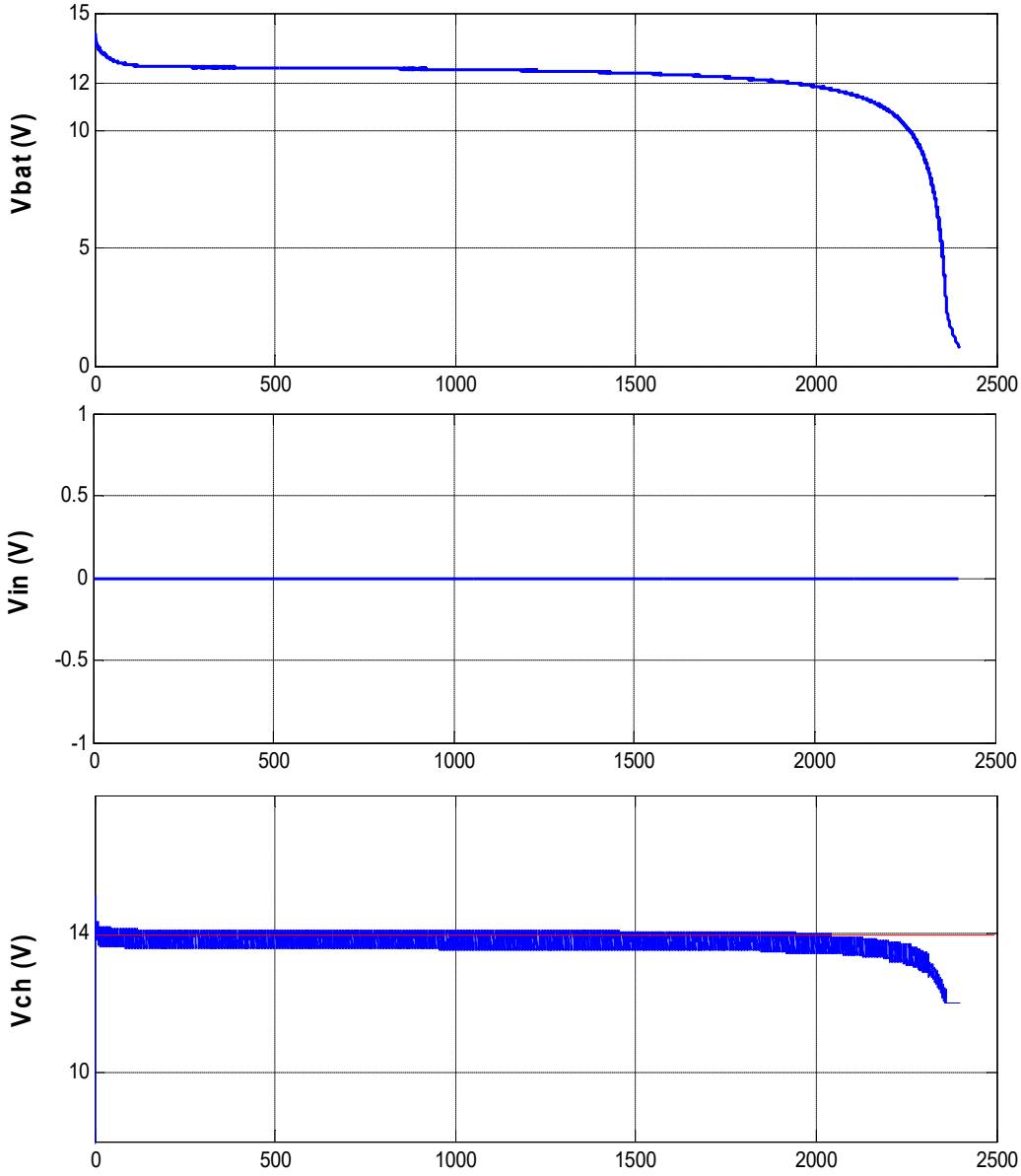


Figure III.17 : évolution de la tension de batterie ; la tension de charge.

Afin de mieux observer le comportement dynamique du système et de mettre en évidence les oscillations apparaissant au régime transitoire, une nouvelle simulation est réalisée sur une période plus courte de 600s. Cette durée réduite permet d'analyser avec plus de précision la réponse du système en mode charge et en mode décharge ainsi que l'efficacité de la stratégie de commande adoptée.

La figure III.18 et la figure III.19 montrent les mêmes variables obtenues précédemment pour le système de charge et de décharge de la batterie, sauf que, nous avons préféré de les représenter sur une durée plus courte afin de mieux visualiser les régimes transitoires qui apparaissent au début du fonctionnement et a l'instant 300sec de passage de la décharge à la charge.

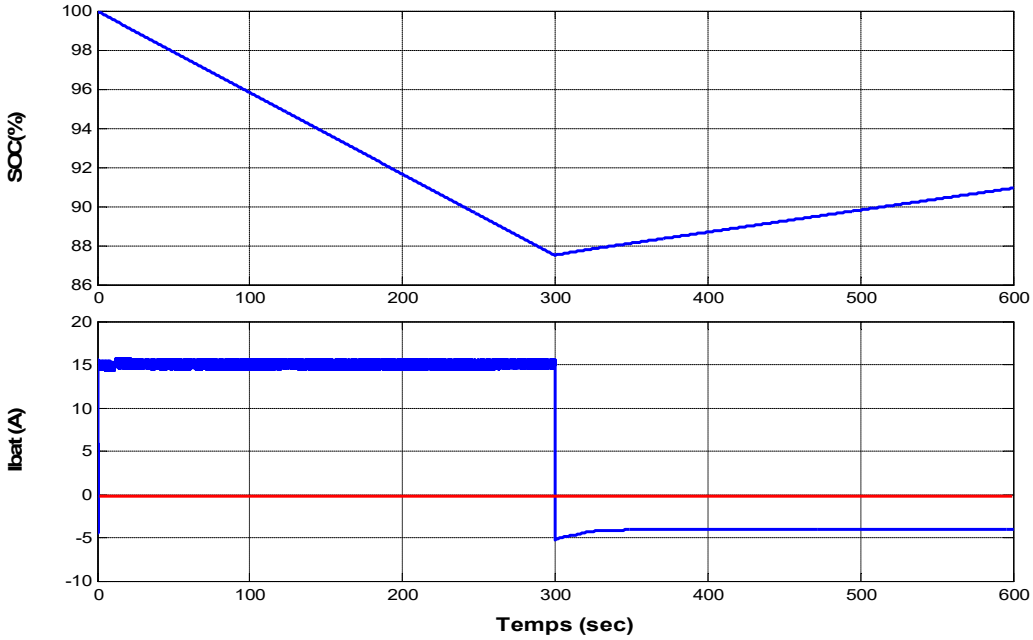


Figure III.18 : L'évolution de l'état de charge, le courant de batterie en mode charge et en mode décharge.

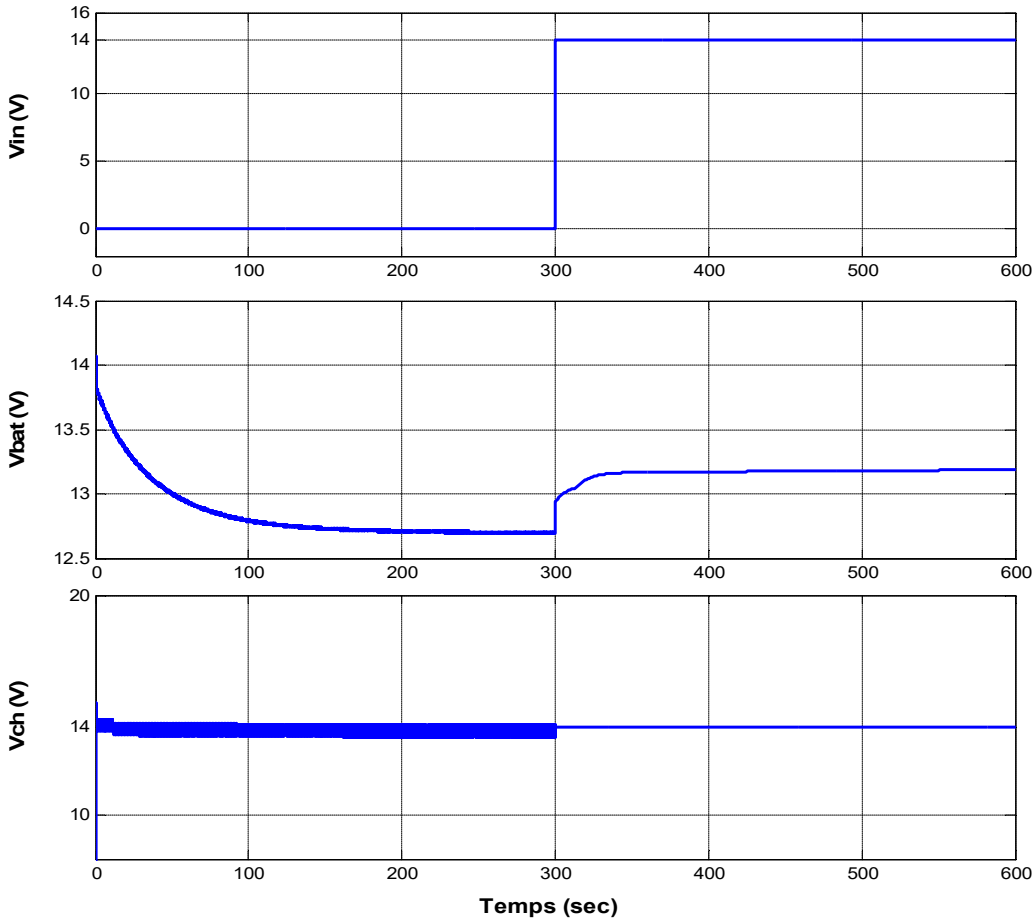


Figure III.19 : L'évolution de l'état de charge, le courant de batterie en mode charge et en mode décharge.

La figure III.18 présente l'évolution du courant de batterie I_{bat} ainsi que l'état de charge SOC. On remarque que les oscillations observées sur le courant apparaissent principalement au démarrage puis diminuent progressivement avec le temps. Sous l'effet du courant qui a pris deux signe, positif en mode décharge et négatif en monde charge (à partir de l'instant 300sec), l'état de charge évolue de manière régulière selon le mode de fonctionnement dy système, le SOC commence à diminuer puis à augmenter.

La courbe de la figure III.19 montre l'évolution de la tension d'entrée $V_{in,}$ de la tension de la batterie V_{bat} et nous avons également représenté la tension de la charge V_{ch}. On a supposé que la tension de la source soit non disponible (nulle) sur l'intervalle de temps avant 300secondes, c'est pour permettre au mode de décharge de fonctionner, puis, et à partir de l'instant 300sec la tension de source est devenu non nulle, ce qui implique du mode charge commence. On observe l'apparition de faibles oscillations au début de la simulation qui correspondent à la phase transitoire du système, mais avec le temps, la tension de la batterie reste proche de sa valeur nominale tandis que la tension décharge demeure voisine de sa valeur de référence égale à 14 V malgré l'absence de la tension de source avant 300 secs. A partir des régimes transitoires de cet instant (instant de passage du mode décharge au mode charge de batterie et bien sûr du convertisseur Buck au Boost), on remarque que les oscillations observées restent faibles et n'affectent pas le fonctionnement du système. La tension de charge reste maintenue autour de sa valeur de référence malgré les variations brusques du courant et de la tension de la batterie.

A partir de la figure III.15, il est possible de remarquer le point de fin pour le fonctionnement normale de la batterie étudié, il correspond à l'instant où la batterie commence a donné des tensions inferieurs à sa tension nominale (d'après le tableau II.1, 12 volts dans notre cas) et c'est l'indice qui indique que nous devons commencer de charger la batterie. Nous avons décidé de simuler un grand intervalle de temps pour voir cela, pour ce faire ; on va commencer une phase de décharge jusqu'à ce que la tension de la batterie atteigne la limite minimale de fonctionnement fixée à 12 V. À partir de cet instant, le système passe automatiquement en mode charge afin de restaurer l'énergie stockée dans la batterie. Les figures III.20 et III.21 présentent l'évolution des principales variables du système durant cette phase.

On observe que la tension de la batterie V_{bat} augmente progressivement à partir de 12 V jusqu'à la saturation qui atteindre sa valeur maximale de charge proche de 14 V. Cette augmentation est accompagnée par une élévation progressive de l'état de charge SOC, qui passe de 0 % à 100 %,

ainsi que par une augmentation de la capacité stockée CN jusqu'à atteindre la capacité nominale de la batterie égale à 10 Ah.

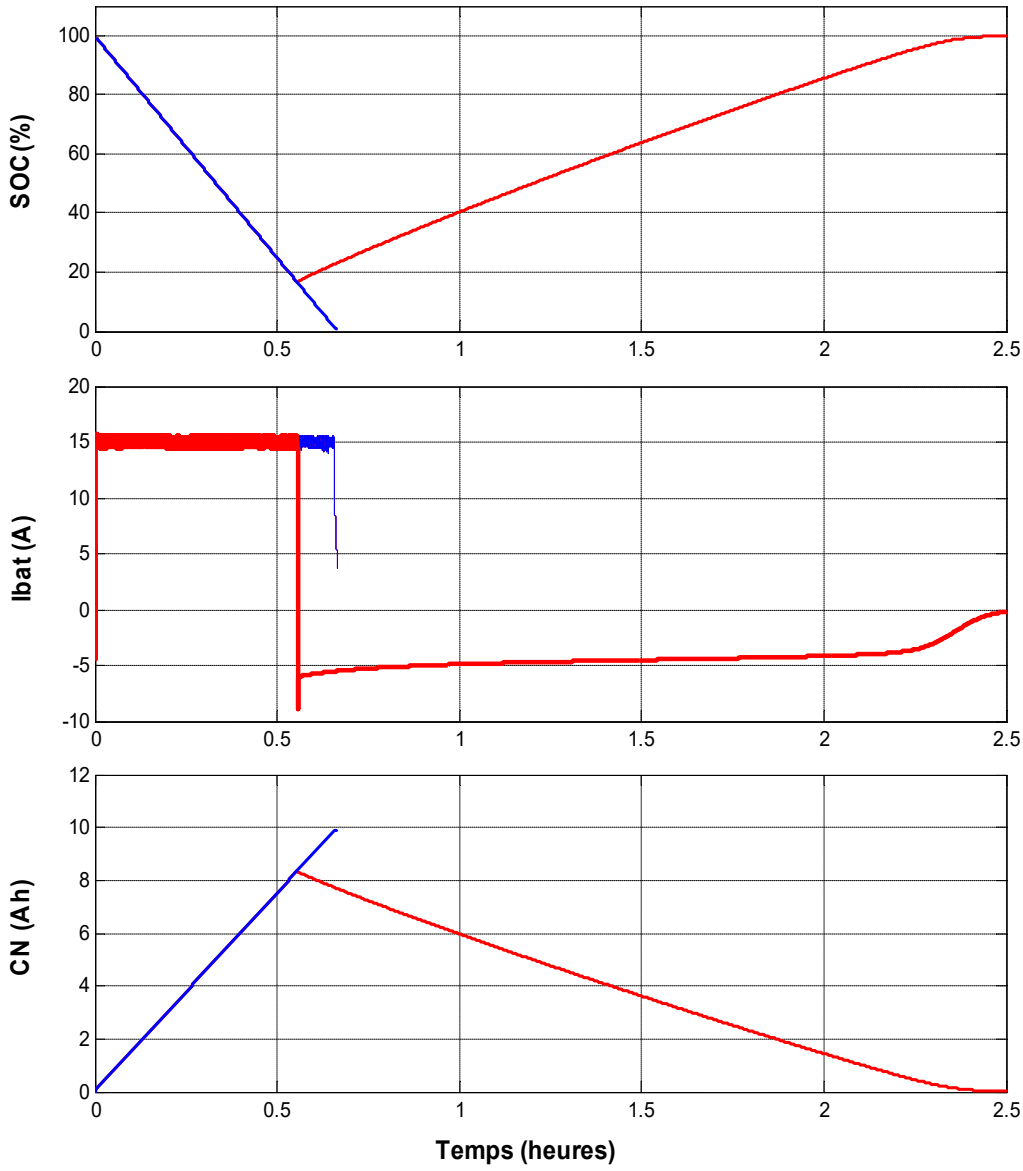


Figure III.20 : l'évolution de l'état de charge, le courant de batterie et la capacité en mode charge et en mode décharge.

Nous avons utilisé un courtant importante de valeur de 15A pour mieux mettre en évidence les résultats de la batterie. De plus, le temps de simulation a été réduit afin d'obtenir des courbes plus claires et d'améliorer l'interprétation des résultats.

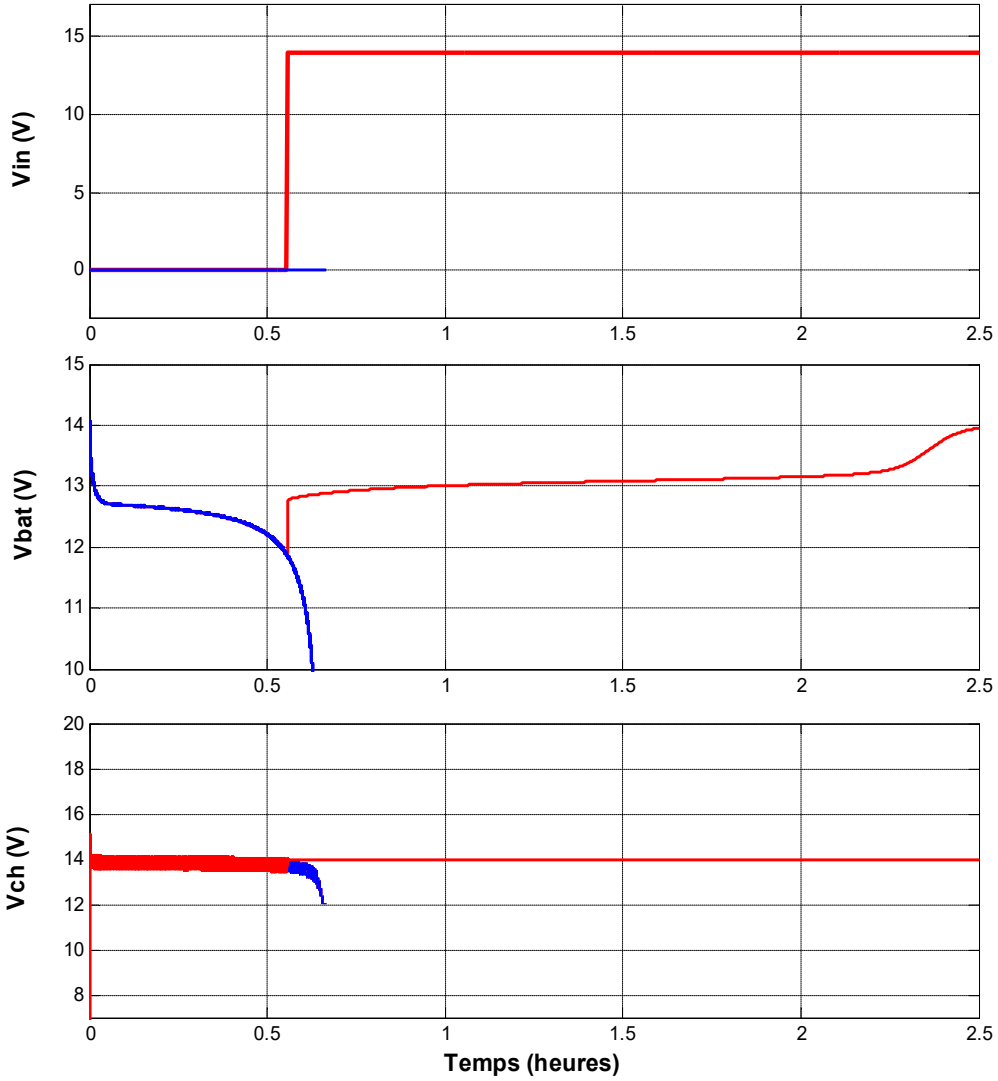


Figure III.21 : l'évolution de la tension d'entrée (Vin), la tension de batterie et la tension de charge en mode charge et en mode décharge.

Au début de la charge, le courant de batterie I_{bat} présente une valeur importante afin d'assurer une recharge rapide de la batterie. Ensuite, il diminue progressivement à mesure que la tension de la batterie augmente jusqu'à l'arrivée à la tension de charge maximale donnée sur le tableau des caractéristiques de la batterie et que le SOC se rapproche de 100 %. À la fin du processus de charge, le courant I_{bat} devient pratiquement nul, ce qui indique que la batterie atteint la saturation ou son état de charge maximal. Sur la même figure, on remarque que la tension de charge V_{ch} reste voisine de sa valeur de référence durant toute la phase de charge. Ceci montre que le convertisseur bidirectionnel fonctionne correctement en mode Buck et assure le transfert de l'énergie nécessaire à la charge et au système de recharge de la batterie.

D'après ces résultats, le système assure correctement la transition entre les modes décharge et charge lorsque la tension de la batterie atteint 12 V, tout en garantissant une recharge complète et sécurisée de la batterie.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande d'un système de charge et de décharge d'une batterie Lithium-Ion basé sur un convertisseur bidirectionnel DC-DC. Après la présentation des caractéristiques de la batterie utilisée, plusieurs simulations ont été réalisées sous Matlab/Simulink afin d'évaluer le comportement du système dans les deux modes de fonctionnement. Les résultats obtenus ont montré que le convertisseur assure correctement le transfert d'énergie entre la batterie et la charge. En mode décharge, la tension de charge est proche de sa valeur de référence malgré la diminution progressive de la tension de la batterie.

En mode charge, le système permet la recharge de la batterie jusqu'à sa pleine capacité tout en respectant les limites de fonctionnement imposées. Les différentes courbes obtenues confirment la bonne performance de la stratégie de commande adoptée ainsi que la stabilité du système durant les phases transitoires et permanentes. Ces résultats valident donc le bon fonctionnement du système de charge/décharge étudié.

Conclusion Générale

Ce travail de fin d'étude nous a permis d'aborder l'étude des batteries ainsi que leur association avec les convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes de stockage d'énergie. Dans un premier temps, nous avons présenté les différentes technologies de batteries et leurs principales caractéristiques. Une attention particulière a été accordée aux batteries Lithium-Ion qui représentent aujourd'hui l'une des solutions les plus utilisées grâce à leurs bonnes performances énergétiques.

Par la suite, nous avons étudié différents modèles de batteries permettant de représenter leur comportement électrique. Cette étude a montré que, malgré l'existence de plusieurs modèles, ceux-ci présentent globalement le même comportement dynamique. Nous avons également constaté que la modélisation des batteries demeure un domaine de recherche important qui continue à évoluer afin d'améliorer la précision des résultats obtenus. Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les systèmes de charge et de décharge des batteries ainsi que les différents convertisseurs DC-DC. Nous avons étudié les convertisseurs réversibles et non réversibles avant de nous intéresser particulièrement aux convertisseurs bidirectionnels non isolés utilisés pour assurer le transfert d'énergie dans les deux sens entre la batterie et la charge. Enfin, dans le dernier chapitre, nous avons réalisé l'étude et la commande d'un système de charge/décharge basé sur une batterie Lithium-Ion associée à un convertisseur bidirectionnel DC-DC. Une commande par régulateur PID a été mise en œuvre sous Matlab/Simulink afin d'assurer une bonne régulation de la tension et du courant. Les résultats obtenus ont montré un fonctionnement satisfaisant du système aussi bien en mode charge qu'en mode décharge, confirmant ainsi la validité de l'approche adoptée. Ce travail nous a permis d'acquérir des connaissances importantes dans les domaines des batteries, de l'électronique de puissance, de la modélisation et de la commande des systèmes énergétiques

Comme perspectives, il serait intéressant d'approfondir l'étude de la modélisation des batteries en tenant compte de phénomènes supplémentaires tels que le vieillissement et les effets thermiques. Il serait également possible d'étudier d'autres structures de convertisseurs bidirectionnels DC-DC ainsi que des stratégies de commande plus avancées. Enfin, une validation expérimentale sur une plateforme réelle constituerait une étape importante pour compléter ce travail.

Références Bibliographique

[1] MAMOUR, Nouna, KHEMICI, Aicha. « *Estimation de l'état de charge de la batterie Lithium-ion »*. 2023.

[2] BOUDIBA, Ahmed Amine, SELLAMI, Tarek, « *Système de gestion de batteries– Estimation de l'état de charge »*. 2021.

[3] Mohamed El Amine BABA ; « *Étude et commande du système de puissance d'un véhicule électrique »* Université de Jijel.2023

[4] https://na.panasonic.ca/fr-ca/dispositifs-industriels/piles-batteries/nickel-metal-hydrure-rechargeables/piles-ni-mh-standard-serie-n

[5] Image inspirée de la vidéo de QuantumScape « What are Solid-State Lithium-Metal Batteries? » https://youtu.be/azACL3lLMo8

[6] POOPANYA, Piyawong, SIVALERTPORN, Kanchana, « *A comparative study on the parameter identification of an equivalent circuit model for an Li-Ion battery based on different discharge tests*. 2022, vol. 13, no 3, p. 50.

[7] KHELIFI. F « *sureté de fonctionnement et fiabilité des circuits de l'électronique de puissance* ». Mémoire de magister, Université de Boumerdès, 2008.

[8] BENADJROUD, Bekhta et CHAACHOUE, Sarah. Commande de vitesse d'un moteur à courant continu Par une carte Arduino. 2024.

[9] Bernardinis, A. « *Architectures de convertisseurs statiques et contrôle-commande associé pour les systèmes pile à combustible et mécatroniques de puissance : Application aux véhicules électriques »*2015.

[10] BOUKHALOUA, H., & BOUADJADJA, N. « *Etude et réalisation d'un hacheur à quatre quadrants commandés par Arduino »2020.*

[11] HADJ ZOUBIR, Noria Sana Afef et SI DJILANI, Fatima. » *Etude et réalisation d'un hacheur Boost destiné à la conversion photovoltaïque »*. Thèse de doctorat. Université Ibn Khaldoun-Tiaret-2018.

[12] BOUZGHAYA. I, *Etude d'un Hacheur à Stockage Capacitif*, Université Larbi Ben Mhidi, Oum El-Bouaghi, Département de Génie Electrique, Mémoire de master, Algérie, juin 2014.

[13] Kaouane, M. « *Contribution à la commande d'un système de conversion hybride photovoltaïque-éolien avec stockage de l'énergie »* (2018).

[14] ABDULKADIR. Z, «*Power électronics Converters, applications, and design, Département of Electrical Engineering »*, Book 3ed, États-Unis, 2004.

[15] BOUGANDOURA, A.W., « *Etude sur la Commande de l'Hacheur Quatre Quadrant », Université Larbi Ben Mhidi*, Oum El-Bouaghi, juin 2013.

[16] Toledo, A. S. « *Commande Directe ET Observation DES Convertisseurs DE Puissance : Application A L'onduleur DE Tension Triphasé »* 2000.

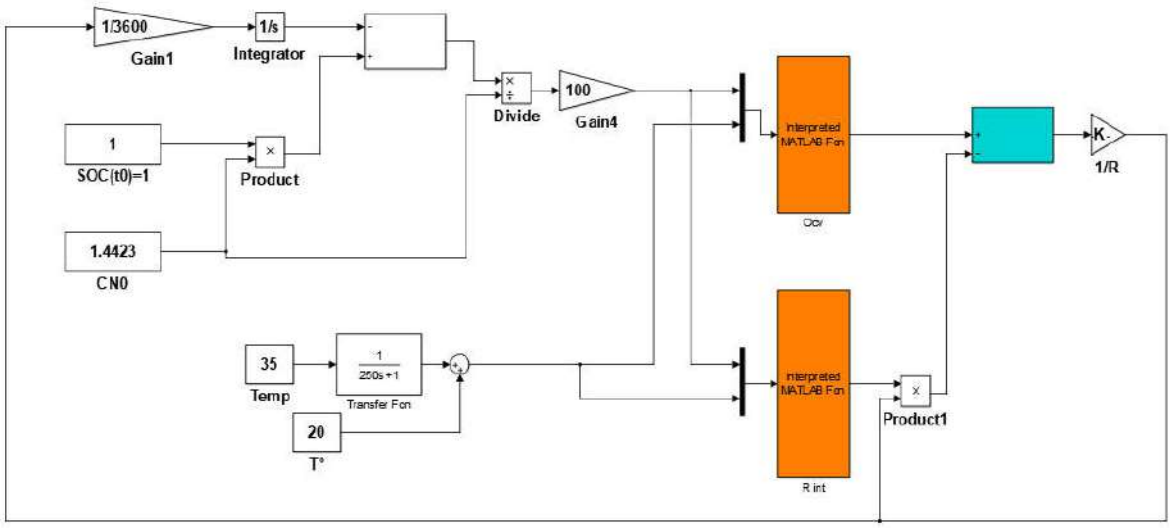
[17] DEROUICH. A, « *Machines à courant continu Fonctionnement en moteur, Université sidi Mohamed ben Abdellah de Fès, Ecole supérieure de technologie, Support de cours electrotechnique1 »*, Maroc, 2011.

[18] Caricchi. F., Crescimbini. F., G. Noia «*Experimental study of a bidirectional DC-DC converter for the DC link voltage control and the regenerative braking in PM motor drives devoted to electrical vehicles»*, of 9th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 1994), Orlando, 13-17 Feb. 1994.

[19] Kang. T., Kim. C., Y. Suh., « *A design and control of bi directional non-isolated DC-DC converter for rapid electric vehicle charging system»*, in Proc. of 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2012), Orlando, 5-9 Feb. 2012.

[20] Radeen, J., & Ajith, A. « *Design and Simulation of Bidirectional DC-DC Converter in Solar PV System for Battery Charging Application».* In *2023*, December
[21] Abdullah. M. A., Yatim. H. M., C. W. Tan «*Control of a bidirectional converter to interface ultracapacitor with renewable energy sources»*, 2013.
[22] Ziegler. J.G., Nichols. N.B. « *Optimum settings for automatic controllers»*. Trans. ASME, 64, pp. 759-768. (1942)
[23] Yildirim, B. « *Design and control of bidirectional DC-DC converters for modular battery energy storage systems»* (2023).
[24] TYTELMAIER, Kostiantyn, HUSEV, Oleksandr, VELIGORSKYI, Oleksandr. *« A review of non-isolated bidirectional dc-dc converters for energy storage systems ».* 2016. p. 22-28.
[25] KARSHENAS, Hamid R., DANESHPAJOOH, Hamid, SAFAEE, Alireza. *Bidirectional dc-dc converters for energy storage systems*. *Energy storage in the emerging era of smart grids*, 2011, vol. 18, p. 161-168.

Annexe A
Schéma de simulation d'une batterie



Annexe B
Principes du réglable PI du système de réglage proposé

La figure suivante représente le schéma de contrôle de la tension V_{DC} de Bus continu (DC bus), le courant de référence I_{bat_ref} est obtenu à partir de régulateur PI. Cette valeur est utilisée pour la boucle de régulation de la batterie.

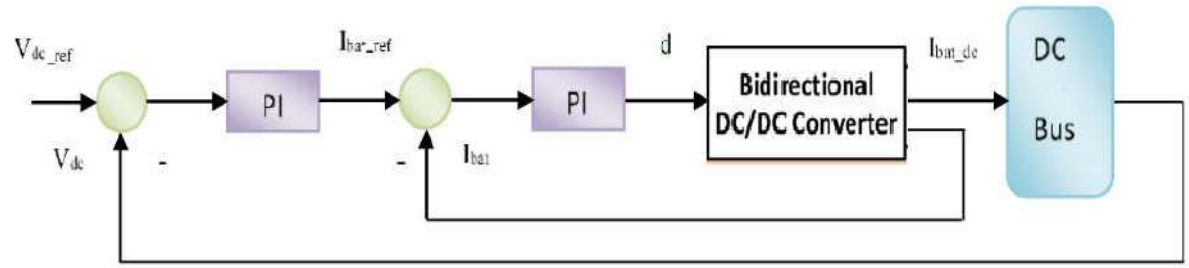


Figure 1 : Schéma de commande utilisant la structure PI

Il est nécessaire de régler la tension DC bus par la distribution de courant de référence I_{bat_ref}.

La tension du bus continu V_{DC} est influencée par les variations du courant de sortie du

convertisseur DC/DC. La boucle de régulation de convertisseur Bidirectionnel ainsi le schéma bloc de système complet sont illustrés sur la figure 2.

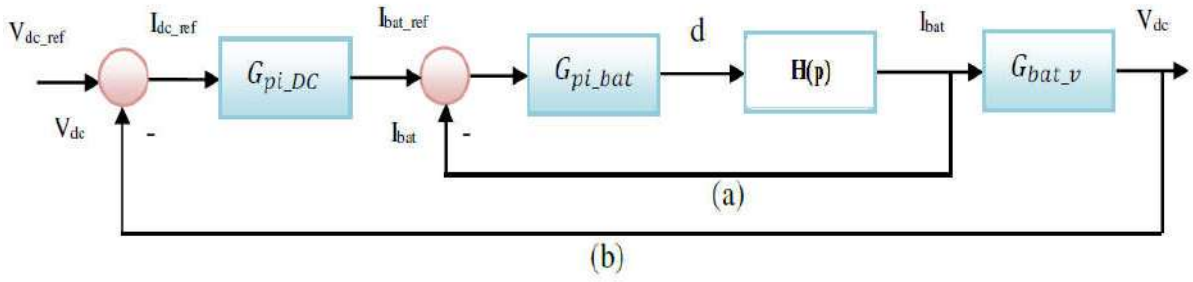


Figure 2 : Schéma de bloc des deux boucles avec fonctions de transferts de la batterie (a) et du système complet (b).

Sachant que G_{PI-dc} et G_{PI-bat} sont les fonctions de transfert des régulateurs PI connues sous la forme suivante :

$$G_{PI} = K_p\left(\frac{\tau_i p+1}{\tau_i p}\right) = K_p + \frac{K_i}{p}$$

Pour la fonction de transfert $H(\mathrm{p})$ elle représente la fonction de transfert du convertisseur, elle est obtenue des deux modes sous lesquelles il peut fonctionner, le mode Buck et le mode Boost, elle sera déterminer des équations différentielles obtenues au chapitre II (équations II.5 et II.6) et (équations II.5 et II.6) sinon en utilisant les fonctions de transfert III.2 et III.10, mais en considérant les sorties comme courant de la batterie mais pas les tensions.