

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique  
Université Djilali Bounaama Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de la Technologie

Mémoire Présenté

Pour l'obtention de Diplôme

Master

En AUTOMATIQUE

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

Thème

Observateur Robuste à la Base d'un  
Contrôleur Non-Linéaire du Convertisseur  
BUCK

*Présenté par*

Mr. BENSALD Abdellatif

Mr. FELLAG Saleh

Jury :

Mr. MAHDAB Salim	UDBKM.	Président
Mr. BENTCHIKOU Brahim	UDBKM	Examineur
Dr. CHOUYA Ahmed	UDBKM	Encadrant

Année Universitaire 2022/2023

# Dédicace

*Je suis comblé de gratitude envers le Tout-Puissant, qui m'a permis d'achever humblement ce travail. Je souhaite chaleureusement dédier cette réalisation à:*

*-Ma mère chérie et mon père, mes plus grands soutiens tout au long de mes études. Leur encouragement et leur patience méritent toute ma reconnaissance. Que Dieu les protège et les guide dans leur vie.*

*-Je tiens à exprimer ma reconnaissance spéciale envers Monsieur **CHOUYA Ahmed**, mon professeur superviseur et promoteur, pour son soutien et son assistance inestimables dans la réalisation de ce travail. Sa guidance a été précieuse et j'en suis reconnaissant. Je souhaite également mentionner mon collègue dans le mémorandum, **BENSAID Abdellatif**.*

*-À mes adorables frères, qui ont été une source de joie et de soutien tout au long de ce parcours. Leur présence et leur amour sont des trésors inestimables dans ma vie.*

*-Mes très chers amis et camarades, je vous adresse ma gratitude sincère pour tous les moments d'échange et de débat que nous avons partagés. Votre soutien indéfectible a été précieux, et je vous suis reconnaissant de tout cœur. Je n'oublie pas non plus de mentionner mes cousines, qui ont également contribué à mon parcours.*

*-Que cette dédicace témoigne de ma reconnaissance infinie envers ceux qui m'ont entouré tout au long de cette aventure. La réalisation de mes études marque un jalon important dans ma vie, et je suis reconnaissant de pouvoir partager ce moment avec vous tous.*



**Saleh**

# Dédicace

*Je dédie cet événement marquant de ma vie À mes très chers parents, source de vie.*

*À mes frères **Yassine** et **Abderrahime** et mes sœurs **Amina** et **Aliaa** , la source bonheur.*

*À tous mes amis, tout particulièrement le groupe **AII** promo 2023 sans exceptions , et à mon cher ami avant d'être mon binôme **Fellag Saleh**.*

*À tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, même qu'il soit un mot d'encouragement et de gentillesse.*

*N'oublier pas ma deuxième famille l'équipe sportif **C.C.Rouina** de cette saison 2022/2023.*



***Abdellatif***

## *Remerciements*

Nous tenons à remercier tout premièrement **ALLAH** le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Dr : CHOUYA AHMED**, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos respects et notre gratitude vont également aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur de juger ce travail.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et les enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de cycle universitaire.

Sans omettre bien sûr de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation du présent travail.

Enfin, et bien avant tout, que notre chers parents et familles, trouvent ici l'expression de nos remerciements les plus sincères et les plus profonds en reconnaissance de leurs sacrifices, aides, soutien et encouragement afin de nous assurer cette formation de Master dans les meilleures conditions.

# Résumé

Le convertisseur DC-DC du type BUCK joue un rôle essentiel dans de nombreux domaines industriels, grâce à leur efficacité énergétique remarquable et leur capacité à résister aux perturbations provenant de la charge et de la source. Ce mémoire se concentre sur le contrôle spécifique des convertisseurs BUCK DC-DC pour le suivi précis de la tension. Pour assurer un suivi rapide et fiable de la tension de sortie sur le bus d'alimentation en courant continu, une nouvelle technique de contrôle robuste non linéaire est proposée. Cette approche intègre de nouveaux paramètres et utilise une méthode composite basée sur la fonction de LYAPUNOV. De plus, un observateur à grand gain est intégré pour observer avec précision de la tension. Cette stratégie innovante gère efficacement les aspects de commutation et de non-linéarité du problème tout en traitant les perturbations de manière efficace. La stabilité du système est soigneusement analysée et garantie par la fonction de LYAPUNOV.

Dans l'ensemble, ce travail de recherche vise à proposer une conception avancée de commande pour le convertisseur BUCK en combinant la méthode de LYAPUNOV avec l'utilisation d'un observateur à grand gain. Les résultats obtenus à travers les simulations et les analyses fournissant des bases solides pour l'amélioration des performances du convertisseur BUCK et ouvriront des perspectives pour de futures recherches dans le domaine de la commande des systèmes d'alimentation à découpage.

**Mots clés : Convertisseur Buck, Tension de Sortie, Rapport cyclique, Fonction de LYAPUNOV, Observateur à grand gain, MLI**

# Abstract

DC-DC BUCK converter plays a crucial role in various industrial sectors, thanks to its remarkable energy efficiency and its ability to withstand disturbances from the load and the source. This thesis focuses on the specific control of DC-DC BUCK converters for precise voltage tracking. To ensure fast and reliable tracking of the output voltage on the DC power bus, a new robust nonlinear control technique is proposed. This approach incorporates new parameters and utilizes a composite method based on LYAPUNOV function. Additionally, a high-gain observer is integrated to accurately estimate the voltage. This innovative strategy effectively manages the switching and nonlinearity aspects of the problem while efficiently handling disturbances. The stability of the system is carefully analyzed and guaranteed by the LYAPUNOV function. Overall, this research work aims to propose an advanced control design for the BUCK converter by combining the LYAPUNOV method with the use of a high-gain observer. The results obtained through simulations and analyses will provide a solid foundation for improving the performance of the BUCK converter and open up prospects for future research in the field of switch-mode power supply control.

**Keywords : BUCK converter, Output voltage, Duty cycle, LYAPUNOV function, High-gain observer, PWM.**

## ملخص

يلعب محول الجهد المستمر إلى تيار مستمر من نوع Buck دورًا حاسمًا في العديد من القطاعات الصناعية، بفضل كفاءته البارزة في استخدام الطاقة وقدرته على تحمل التشويشات من الحمل والمصدر. تركز هذه المذكرة على التحكم المحدد لمحول Buck DC-DC لتتبع الجهد بدقة. لضمان تتبع سريع وموثوق للجهد الخرج على حافلة تيار مستمر، يتم اقتراح تقنية تحكم جديدة وقوية غير خطية. تتضمن هذه الطريقة معلمات جديدة وتستخدم طريقة مركبة مبنية على دالة Lyapunov. بالإضافة إلى ذلك، يتم دمج مراقب عالي الربح لتقدير التيار بدقة. تدير هذه الاستراتيجية المبتكرة بشكل فعال جوانب التبديل وغير الخطية للمشكلة مع التعامل الفعال مع التشويشات. يتم تحليل استقرار النظام بعناية وضمانه من خلال دالة Lyapunov.

بشكل عام، يهدف هذا العمل البحثي إلى اقتراح تصميم تحكم متقدم عن طريق دمج دالة Lyapunov مع استخدام مراقب عالي الربح لمحول Buck. ستوفر النتائج التي تم الحصول عليها من خلال المحاكاة والتحليل أساسًا قويًا لتحسين أداء محول Buck وتفتح آفاقًا للبحوث المستقبلية في مجال التحكم في مزودات الطاقة البديلة.

**الكلمات الرئيسية:** محول Buck، دالة Lyapunov، جهد الإخراج، نسبة العمل النبضي، مراقب عالي الربح، التحويل النبضي للتردد.

# Table des matières

<b>Dédicace</b>	<b>i</b>
<b>Remerciements</b>	<b>iii</b>
<b>Résumé</b>	<b>iv</b>
<b>Table des matières</b>	<b>vi</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>viii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>ix</b>
<b>Liste des Notations et Abréviations</b>	<b>xi</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Modélisation de Convertisseur BUCK</b>	<b>2</b>
1.1 Introduction . . . . .	2
1.2 Convertisseurs Statiques . . . . .	3
1.3 Convertisseurs DC-DC . . . . .	3
1.4 Différents Types de Convertisseurs DC-DC . . . . .	4
1.4.1 Convertisseur BOOST . . . . .	4
1.4.2 Convertisseur BUCK-BOOST . . . . .	5
1.4.3 Convertisseur CUK . . . . .	5
1.4.4 Convertisseur BUCK . . . . .	5
1.5 Modélisation d'un Convertisseur BUCK . . . . .	7
1.5.1 Modèle mathématique . . . . .	7
1.5.2 Représentation d'états . . . . .	9
1.5.3 Modèle d'état du convertisseur BUCK . . . . .	10
1.6 Conclusion . . . . .	11

<b>2</b>	<b>Commande Basée sur la Fonction de LYAPUNOV</b>	<b>12</b>
2.1	Introduction . . . . .	12
2.2	Conception de Commande Non Linéaire . . . . .	13
2.2.1	Systèmes non linéaires . . . . .	13
2.2.2	Commande des systèmes non linéaires . . . . .	13
2.3	Commande Basée sur la Fonction de LYAPUNOV pour les Systèmes Non Linéaires	14
2.3.1	Historique . . . . .	14
2.3.2	Méthode de LYAPUNOV . . . . .	15
2.3.3	Tâches typiques de la commande basée sur la fonction de LYAPUNOV . .	15
2.3.4	Domaines d'application de la commande basée sur la fonction de LYAPUNOV . . . . .	16
2.4	Application de la Méthode de LYAPUNOV au Convertisseur BUCK . . . . .	16
2.4.1	Choix de la fonction de LYAPUNOV . . . . .	16
2.4.2	Synthèse de la loi de commande pour le convertisseur BUCK . . . . .	19
2.5	Conclusion . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Observateur à Grand Gain pour le Convertisseur BUCK</b>	<b>20</b>
3.1	Introduction . . . . .	20
3.2	Observateur . . . . .	21
3.3	Principe de Fonctionnement . . . . .	21
3.3.1	Objectif d'observateur . . . . .	21
3.3.2	Structure d'observateur . . . . .	22
3.4	Observateur à Grand Gain . . . . .	23
3.5	Conception de L'observateur à Grand Gain pour le Convertisseur BUCK . . . .	24
3.5.1	Stabilité et Convergence de l'observateur à grand gain . . . . .	26
3.5.2	Observateur dans les coordonnées initiales . . . . .	27
3.6	Conclusion . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Simulation et Résultats</b>	<b>29</b>
4.1	Introduction . . . . .	29
4.2	Paramètres du Système . . . . .	29
4.3	Simulation de Commande Basée sur la Fonction de LYAPUNOV du Convertisseur BUCK . . . . .	31
4.4	Simulation de L'observateur à Grand Gain pour le Convertisseur BUCK . . . .	33
4.5	Conclusion . . . . .	35
	<b>Conclusion</b>	<b>36</b>
	<b>Annexe</b>	<b>37</b>

**Bibliographie**

# Table des figures

1.1	Différents types de convertisseurs statiques . . . . .	3
1.2	Symbole d'un convertisseur DC-DC . . . . .	4
1.3	Schéma du convertisseur BUCK . . . . .	6
1.4	Schéma équivalent $S_w$ est fermé . . . . .	7
1.5	Schéma équivalent $S_w$ est ouvert . . . . .	9
2.1	Schéma de principe du commande d'un système non linéaire. . . . .	14
3.1	Diagramme structurel d'un observateur . . . . .	22
3.2	Diagramme structurel d'un observateur d'ordre plein . . . . .	23
4.1	Diagramme général de la commande non linéaire pour un convertisseur DC-DC BUCK avec un observateur à grand gain. . . . .	30
4.2	Schéma de simulation pour convertisseur BUCK basée sur la fonction de LYAPUNOV . . . . .	31
4.3	Simulation de tension de sortie $V_c$ . . . . .	31
4.4	Simulation de courant d'inductance $i_L$ . . . . .	32
4.5	Erreur de tension du sortie . . . . .	32
4.6	Erreur de courant d'inductance . . . . .	33
4.7	Schéma de simulation d'un observateur à grand gain pour le convertisseur BUCK	33
4.8	Simulation de tension de sortie $\hat{V}_c$ . . . . .	34
4.9	Simulation de courant de sortie $\hat{i}_L$ . . . . .	34
4.10	Erreur de tension du sortie . . . . .	35
4.11	Erreur de courant d'inductance . . . . .	35
12	Bloc simulink de convertisseur Buck . . . . .	37
13	Bloc simulink de $\alpha$ . . . . .	38
14	Bloc simulink d'observateur à grand gain . . . . .	39
15	Bloc simulink de $V_{cref}$ . . . . .	40

# Liste des tableaux

4.1	Paramètres du convertisseur BUCK DC-DC [1]	30
4.2	Gains des contrôleurs proposés	30

# Liste des Notations et Abréviations

## Liste des Notations

$E$	Tension d'entrée
$V_c$	Tension de condensateur
$R$	Charge de résistance
$C$	Condensateur .
$L$	Inducteur .
$f$	fréquence .
$S_w$	Interrupteur commandé .
$V_D$	Tension de diode .
$D$	Diode .
$V_L$	Tension de l'inductance.
$i_s$	Courant de sortie .
$i_c$	Courant de condensateur.
$i_L$	Courant d'inductance
$\alpha$	Rapport Cyclique .
$V_{cref}$	Tension de référence .
$i_{Lref}$	Courant de référence .
$e$	Erreur.
$\lambda_1, \lambda_2$ et $\lambda_3$	Paramètres des contrôleurs proposé.
$\vartheta$	Paramètre d'observateur proposé .
$\hat{i}_L$	Courant observé .
$\hat{V}_c$	Tension observée .
$V$	Fonction de LYAPUNOV .
$R^n$	Dimension de l'espace articulaire.
$R^m$	Dimension de l'espace opérationnel.

## Liste des Abréviations

$MLI$	Modulation de Largeur d'impulsion .
$DC$	Courant continue .
$AC$	Courant Alternatif .

# Introduction Générale

Le présent travail se focalise sur l'étude et la conception d'une commande avancée pour le convertisseur Buck, un dispositif électronique utilisé dans les systèmes d'alimentation à découpage. Le convertisseur Buck est largement utilisé dans de nombreuses applications industrielles en raison de ses avantages en termes d'efficacité énergétique et de régulation de tension.

Le chapitre 1 sert la base à notre étude en présentant les concepts de base des convertisseurs statiques et des convertisseurs DC-DC, ainsi que les différents types de convertisseurs DC-DC existants. Nous concentrons particulièrement sur le convertisseur Buck, en examinant son application, son principe de fonctionnement et en proposant une modélisation mathématique détaillée.

Le chapitre 2 explore une approche puissante pour la commande des systèmes non linéaires tels que le convertisseur Buck. Nous abordons les concepts fondamentaux de la commande non linéaire, en mettant l'accent sur la méthode de Lyapunov. Nous présentons l'historique de cette méthode, sa méthode de conception, les tâches typiques de la commande basée sur la fonction de Lyapunov et ses domaines d'application. De plus, nous examinons spécifiquement l'application de la méthode de Lyapunov au convertisseur Buck, en mettant en évidence le choix de la fonction de Lyapunov et la conception de la commande non linéaire.

Le chapitre 3 se concentre sur l'estimation de l'état du système à l'aide d'un observateur à grand gain. Nous explorons les principes de fonctionnement de l'observateur à grand gain, en décrivant sa structure et en analysant son objectif. De plus, nous nous intéressons à la conception de l'observateur à grand gain, en examinant sa stabilité, sa convergence et sa mise en œuvre dans les coordonnées initiales du convertisseur Buck.

Le chapitre 4 est étroitement lié aux chapitres précédents, en mettant en évidence la mise en pratique des approches de commande étudiées. Nous commençons par présenter les paramètres du système, puis nous procédons à la simulation et à l'analyse des résultats de la commande basée sur la fonction de Lyapunov et de l'observateur à grand gain. Ces simulations et résultats fournissent une évaluation approfondie des performances d'approche de commande, en mettant en évidence leur efficacité, leur précision de régulation et leur robustesse.

Finalement, nous présentons une conclusion sur l'ensemble de cette étude en donnant quelques perspectives.

# Modélisation de Convertisseur BUCK

## Sommaire

---

<b>1.1 Introduction</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Convertisseurs Statiques</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Convertisseurs DC-DC</b>	<b>3</b>
<b>1.4 Différents Types de Convertisseurs DC-DC</b>	<b>4</b>
1.4.1 Convertisseur BOOST	4
1.4.2 Convertisseur BUCK-BOOST	5
1.4.3 Convertisseur CUK	5
1.4.4 Convertisseur BUCK	5
1.4.4.1 Application	6
1.4.4.2 Principe de fonctionnement	7
<b>1.5 Modélisation d'un Convertisseur BUCK</b>	<b>7</b>
1.5.1 Modèle mathématique	7
1.5.2 Représentation d'états	9
1.5.3 Modèle d'état du convertisseur BUCK	10
<b>1.6 Conclusion</b>	<b>11</b>

---

## 1.1 Introduction

Le chapitre de notre étude porte sur la modélisation du convertisseur BUCK, un type de convertisseur DC-DC largement utilisé dans les applications d'électronique de puissance. Ce chapitre vise à fournir une compréhension approfondie du fonctionnement et de la modélisation mathématique de ce convertisseur, ainsi qu'une introduction aux différents types de convertisseurs DC-DC.

Dans la première partie de ce chapitre, nous commencerons par une introduction générale sur les convertisseurs statiques et les convertisseurs DC-DC et nous essayons de comprendre leurs bases .

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous concentrerons sur le convertisseur BUCK lui-même. Nous aborderons d'abord ses applications, en soulignant les domaines où il est couramment utilisé et ses avantages dans ces contextes. Ensuite, nous expliquerons en détail le principe de fonctionnement du convertisseur BUCK et nous entrerons dans la modélisation d'un convertisseur BUCK, nous présenterons le modèle mathématique et nous discuterons également

de leur représentation d'états. Enfin, nous présenterons le modèle d'état complet du convertisseur BUCK, nous expliquerons comment ce modèle nous permet d'analyser et de simuler le comportement du convertisseur BUCK dans différentes configurations.

## 1.2 Convertisseurs Statiques

Les convertisseurs statiques utilisent des semi-conducteurs de puissance tels que des diodes, thyristors et transistors pour transformer le signal électrique en adaptant ses amplitudes, fréquences et phases. Cette discipline est connue sous le nom d'électronique de puissance [2]. Il existe différents types de convertisseurs :

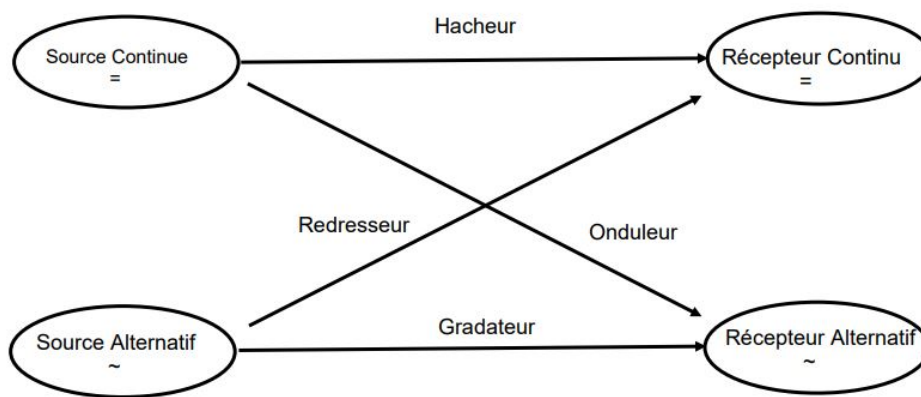


FIGURE 1.1 – Différents types de convertisseurs statiques

**Redresseurs** : Ils convertissent le courant alternatif en courant continu avec une tension de sortie moyenne non nulle. Ils sont utilisés pour alimenter des charges fonctionnant en courant continu ou pour recharger des batteries.

**Onduleurs** : Ils convertissent le courant continu en courant alternatif. Ils sont principalement utilisés pour alimenter des charges qui nécessitent du courant alternatif ou pour injecter l'énergie des panneaux solaires dans le réseau électrique. On distingue les onduleurs autonomes, qui peuvent fonctionner indépendamment du réseau, et les onduleurs non autonomes, qui utilisent le réseau électrique pour leur fonctionnement.

**Gradateurs** : Ils réduisent la valeur efficace d'une tension alternative de même fréquence que la tension d'entrée. Ils sont principalement utilisés pour réguler la vitesse des moteurs alternatifs tels que les moteurs asynchrones ou synchrones en ajustant leur tension d'alimentation.

## 1.3 Convertisseurs DC-DC

Un convertisseur DC-DC (aussi appelé un hacheur) est un circuit électronique qui permet de convertir une tension continue d'un niveau donné en une autre tension continue de niveau différent. Le principe de fonctionnement du convertisseur repose sur l'utilisation d'un interrupteur électronique, généralement un transistor, qui permet de connecter et déconnecter le circuit

d'entrée de celui de sortie à une fréquence élevée. Cette opération crée des impulsions de tension (ou des signaux carrés) qui peuvent être lissées pour fournir une tension continue de sortie de niveau variable [3].

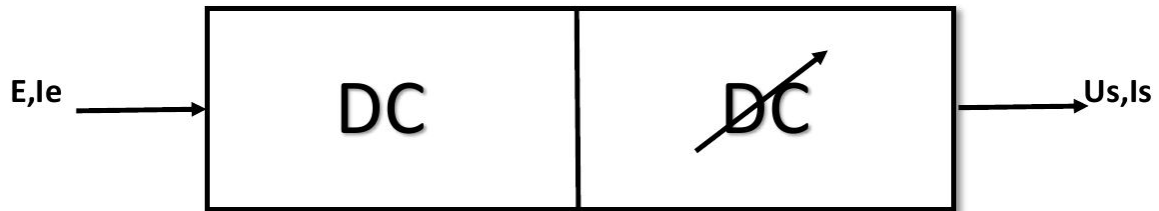


FIGURE 1.2 – Symbole d'un convertisseur DC-DC

Les convertisseurs sont couramment utilisés dans les systèmes d'alimentation électrique, les moteurs électriques, les panneaux solaires, les convertisseurs de puissance, les onduleurs et dans de nombreux autres dispositifs électroniques nécessitant des conversions de tension continues efficaces et précises [4].

## 1.4 Différents Types de Convertisseurs DC-DC

La structure des convertisseurs dépend du cahier des charges imposé au système, qui peut spécifier la nature des réseaux d'entrée et de sortie ainsi que les contraintes de régulation de la tension de sortie. En fonction de ces exigences, différents types de convertisseurs peuvent être utilisés, notamment :

### 1.4.1 Convertisseur BOOST

Le convertisseur BOOST est un convertisseur DC-DC élévateur. Il est utilisé pour augmenter la tension continue d'une source d'alimentation continue en régulant le rapport cyclique d'un signal de commande à haute fréquence [5]. Le convertisseur BOOST est largement utilisé dans les applications d'alimentation électrique pour alimenter des charges nécessitant une tension continue plus élevée que celle fournie par la source d'alimentation. Il est également utilisé dans les systèmes photovoltaïques pour réguler la tension de la batterie [3]. Le convertisseur BOOST est composé d'un interrupteur électronique (généralement un transistor), d'un inducteur, d'un condensateur et d'une charge [6]. Lorsque l'interrupteur est fermé, l'inducteur stocke de l'énergie sous forme de champ magnétique. Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inducteur décharge cette énergie vers le condensateur et la charge, en augmentant la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée.

Les convertisseurs BOOST sont couramment utilisés dans de nombreuses applications, telles que les systèmes d'alimentation de secours, les applications solaires, les systèmes de conversion d'énergie, les applications de charge de batteries et d'autres dispositifs électroniques nécessitant une augmentation de tension.

### 1.4.2 Convertisseur BUCK-BOOST

Un convertisseur BUCK-BOOST est un type spécifique de convertisseur continu-continu utilisé pour ajuster la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée. Il peut fonctionner dans deux modes principaux : le mode dévolteur (abaisseur) et le mode survolteur (élevateur) [4]. En mode abaisseur, le convertisseur BUCK-BOOST abaisse la tension d'entrée pour obtenir une tension de sortie inférieure. Cela est utile lorsque la charge nécessite une tension inférieure à la tension d'entrée. Le convertisseur régule la tension de sortie en contrôlant le rapport cyclique du signal de commutation. En mode élevateur, le convertisseur BUCK-BOOST élève la tension d'entrée pour obtenir une tension de sortie supérieure. Cela peut être nécessaire lorsque la charge nécessite une tension supérieure à la tension d'entrée. Encore une fois, le rapport cyclique du signal de commutation est ajusté pour réguler la tension de sortie. Le convertisseur BUCK-BOOST est largement utilisé dans de nombreuses applications, telles que les systèmes d'alimentation de batterie, les sources d'énergie solaire, les applications automobiles, les systèmes d'éclairage à LED et d'autres dispositifs électroniques nécessitant une adaptation précise de la tension d'alimentation [3].

### 1.4.3 Convertisseur CUK

Un convertisseur CUK est un type de convertisseur DC-DC qui permet de convertir une tension d'entrée continue en une tension de sortie continue de niveau différent, tout en offrant une isolation galvanique entre l'entrée et la sortie [3]. Contrairement à d'autres types de convertisseurs DC-DC, le convertisseur CUK est capable de fonctionner avec un rapport cyclique d'entrée inférieur à 0.5, ce qui en fait un choix populaire pour les applications nécessitant un faible rapport cyclique. Le convertisseur CUK est également caractérisé par un circuit de rétroaction qui permet de maintenir la tension de sortie constante malgré les variations de la charge et de l'entrée [4]. Le circuit du convertisseur CUK est constitué d'un condensateur, de deux inductances, d'un interrupteur et d'une diode, disposés de manière à former une boucle de rétroaction. Lorsque l'interrupteur est fermé, l'énergie est stockée dans l'inductance principale et le condensateur. Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'énergie est transférée de l'inductance principale à l'inductance secondaire et à la charge via la diode.

### 1.4.4 Convertisseur BUCK

Dans notre travail on se base sur les convertisseurs BUCK, un convertisseur BUCK est un type de convertisseur de puissance électrique, également appelé convertisseur abaisseur (BUCK). La figure 1.3 présente le schéma de principe du convertisseur BUCK [1].

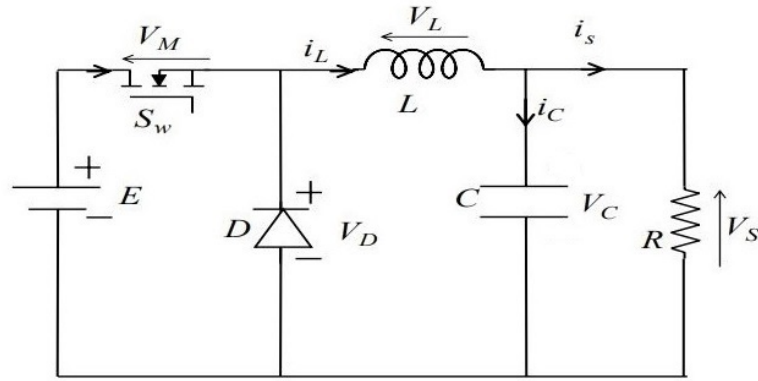


FIGURE 1.3 – Schéma du convertisseur BUCK

Il permet de convertir une tension continue (DC) de valeur élevée à une tension continue de valeur plus basse. Le convertisseur BUCK utilise un interrupteur commandé (transistor ou MOSFET) pour contrôler le courant traversant une inductance, afin de réguler la tension de sortie [3, 4, 7].

#### 1.4.4.1 Application

Ce type de convertisseur est utilisé dans nombreuses applications d'électronique de puissance, notamment [8] :

- Régulation de tension : Les convertisseurs BUCK sont utilisés pour obtenir une tension continue fixe à partir d'une source de tension continue supérieure. Ils peuvent être utilisés pour réguler la tension d'alimentation des composants électroniques tels que les processeurs, les micro-contrôleurs et les circuits intégrés. Par exemple, ils peuvent convertir les 12-24 volts fournis par une batterie d'ordinateur portable en une tension plus basse et régulée nécessaire au fonctionnement du processeur.

- Conversion de tension secteur : Les convertisseurs BUCK sont également utilisés pour convertir la tension alternative du secteur en une tension continue fixe. Par exemple, dans les alimentations à découpage, ils sont utilisés pour réduire la tension secteur à une tension continue adaptée aux besoins des dispositifs électroniques.

- Variateurs de tension continue : Les convertisseurs BUCK peuvent être utilisés comme variateurs de tension continue. Ils permettent de régler la tension de sortie à une valeur inférieure à la tension d'entrée. Cela peut être utile dans certaines applications où une tension variable est requise, comme dans les systèmes d'éclairage à LED ou les systèmes de charge de batteries.

Le convertisseur BUCK est apprécié pour sa simplicité de conception, sa haute efficacité et sa capacité à gérer des tensions d'entrée et de sortie élevées avec un faible encombrement et un coût abordable. Dans tous ces cas, il est important que l'impédance interne du système créé par le convertisseur BUCK soit faible, comparable à celle du générateur d'alimentation. Cela garantit un rendement élevé et évite les pertes d'énergie inutiles.

### 1.4.4.2 Principe de fonctionnement

Le convertisseur BUCK (abaisseur) a une unité de commutation composée d'un commutateur contrôlable et diodes qui fonctionneront simultanément dans le mode opposé [8, 9]. Le convertisseur BUCK doit être connecté à une charge inductive par ses caractéristiques de stockage d'énergie, la charge alternera consommation de tension pour son fonctionnement et son comportement équivalent à une source de tension. L'opération peut être divisée en deux séquences de phase en fonction de l'état de l'interrupteur commandable  $S_w$  (figure 1.3) : Nous fermons l'interrupteur  $S_w$  (figure 1.4). Le courant fourni par le générateur, initialement nul, augmente linéairement à travers l'inductance. L'inducteur s'oppose à l'augmentation du courant, produisant une tension opposée et il stocke l'énergie reçue sous forme magnétique. La tension aux bornes de l'inductance est

$$V_L = E - V_s = L \frac{di_L}{dt}$$

Étant donné que la diode est polarisée en inverse à partir de la tension du générateur  $S_w$ , alors le courant ne la traverse pas.

L'interrupteur  $S_w$  est ouvert (figure 1.5). Le générateur est éliminé ; plus aucun courant ne le traverse. La diode devient conductrice pour assurer la continuité du courant dans l'inductance ; le courant traversant l'inductance diminue. L'inductance s'oppose à cette diminution de courant en produisant une tension qui la met à l'état source du circuit aval en utilisant de l'énergie stockée magnétique de l'étape précédente, la tension aux bornes de l'inductance est

$$V_L = -V_s$$

## 1.5 Modélisation d'un Convertisseur BUCK

### 1.5.1 Modèle mathématique

Dans le mode de conduction continu, il existe deux configurations selon l'état de commutateur  $S_w$  comme indiqué en :

1<sup>er</sup> cas l'intervalle  $t_0 < t < t_0 + \alpha T$

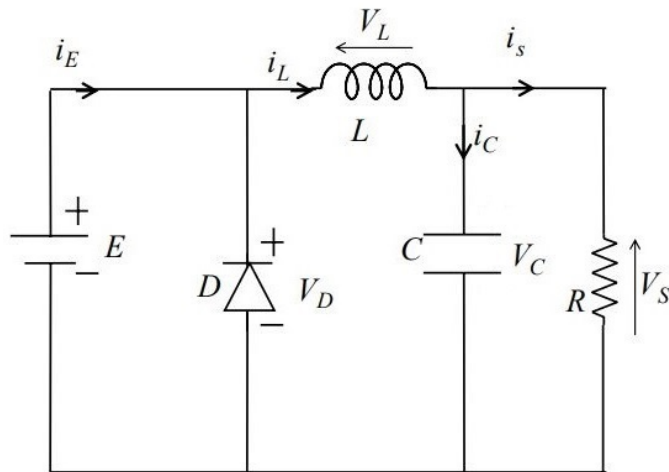


FIGURE 1.4 – Schéma équivalent  $S_w$  est fermé

Les équations régissant le fonctionnement de l'interrupteur  $S_w$  a l'état fermé sont données ci-dessous. Pour  $i_L$  lorsque on applique la loi de maille sur le circuit ( figure 1.4); on aura l'équation suivante :

$$E - V_s = V_L \quad (1.1)$$

On a

$$i_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (1.2)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = E - V_s \quad (1.3)$$

Avec :

$$V_s = V_c \Rightarrow \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}E - \frac{1}{L}V_c \quad (1.4)$$

Pour  $V_c$  lorsque on applique la loi des nœuds sur le circuit ( figure 1.4); on aura l'équation suivante :

$$i_c = i_L - i_s \quad (1.5)$$

On a

$$i_c = C \frac{dV_c}{dt} \quad (1.6)$$

Et

$$i_s = \frac{V_s}{R} \quad (1.7)$$

On remplace  $i_c$  et  $i_s$  avec ses valeurs

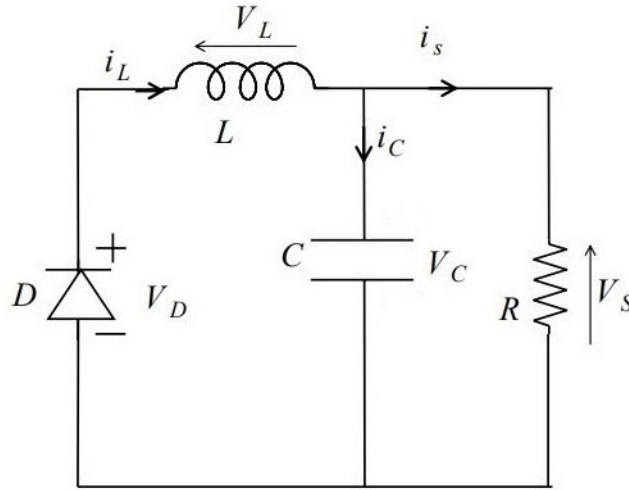
$$C \frac{dV_c}{dt} = i_L - \frac{V_s}{R} \quad (1.8)$$

Le comportement dynamique du circuit est alors donné par :

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{CR}V_c \quad (1.9)$$

2<sup>ème</sup> cas l'intervalle  $t_0 + \alpha T < t < t_0 + T$

Les équations régissant le fonctionnement de l'interrupteur  $S_w$  a l'état ouvert sont données ci-dessous. Pour  $V_c$  lorsque on applique la loi des nœuds sur le circuit ( figure 1.5); on aura l'équation suivante :


 FIGURE 1.5 – Schéma équivalent  $S_w$  est ouvert

$$i_c + i_s = i_L \quad (1.10)$$

On a

$$i_c = C \frac{dV_c}{dt} \quad (1.11)$$

Et

$$i_s = \frac{V_s}{R} \quad (1.12)$$

On remplace  $i_c$  et  $i_s$  avec ses valeurs

$$i_L = C \frac{dV_c}{dt} + \frac{V_s}{R} \Rightarrow C \frac{dV_c}{dt} = -\frac{V_c}{R} + i_L \quad (1.13)$$

Alors :

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{RC} V_c \quad (1.14)$$

Pour  $i_L$ , on applique la loi de maille sur le circuit (figure 1.5) ; on aura l'équation suivante :

$$V_L = -V_c \quad (1.15)$$

Alors :

$$L \frac{di_L}{dt} = -V_c \Rightarrow \frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L} V_c \quad (1.16)$$

### 1.5.2 Représentation d'états

Dans la plus part des cas, l'évolution en fonction du temps du système peut être décrite par les deux équations suivantes qui constituent la représentation d'état.

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u, t) & \text{équation d'état .} \\ y = g(x, u, t) & \text{équation de sortie.} \end{cases} \quad (1.17)$$

Dans le cas où le système considéré est linéaire, la représentation d'état se met sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (1.18)$$

Pour le choix des variables d'états; on prend :

$$\begin{aligned} i_L = x_1 &\Rightarrow \frac{di_L}{dt} = \dot{x}_1 \\ V_c = x_2 &\Rightarrow \frac{dV_c}{dt} = \dot{x}_2 \end{aligned}$$

Dans la première séquence de conduction l'intervalle  $t_0 < t < t_0 + \alpha T$

$$\begin{cases} \dot{x} = A_{on}x + B_{on}u \\ y = C_{on}x \end{cases} \quad (1.19)$$

A partir des équations (1.4) et (1.9), le système devient sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} E \quad (1.20)$$

Dans la deuxième séquence l'intervalle  $t_0 + \alpha T < t < t_0 + T$

$$\begin{cases} \dot{x} = A_{off}x + B_{off}u \\ y = C_{off}x \end{cases} \quad (1.21)$$

A partir des équations (1.14) et (3.21), le système sous forme matricielle devient :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} E \quad (1.22)$$

### 1.5.3 Modèle d'état du convertisseur BUCK

A partir (1.19) et (1.21), on peut déduire la forme de  $i_L$  et  $V_s$  pour toute la période. On a :

$$\begin{aligned} i_L = x_1 &\Rightarrow \frac{di_L}{dt} = \dot{x}_1 \\ V_c = x_2 &\Rightarrow \frac{dV_c}{dt} = \dot{x}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \dot{x} = (A_{on}x_1 + B_{on}x_2)\alpha + (A_{off}x_1 + B_{off}x_2)(1 - \alpha) \\ y = (C_{on}\alpha + C_{off}(1 - \alpha))x \end{cases} \quad (1.23)$$

Par arrangement de ces équations, on peut déduire la forme moyenne des matrices .

$$\begin{cases} A = A_{on}\alpha + A_{off}(1 - \alpha) & \text{la matrice d'état.} \\ B = B_{on}\alpha + B_{off}(1 - \alpha) & \text{la matrice de commande.} \\ C = C_{on}\alpha + C_{off}(1 - \alpha) & \text{la matrice de sortie.} \end{cases} \quad (1.24)$$

Pour la matrice d'état :

$$A = A_{on}\alpha + A_{off}(1 - \alpha) \Rightarrow A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\alpha}{L} \\ \frac{\alpha}{C} & -\frac{\alpha}{RC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-\alpha)}{L} \\ \frac{(1-\alpha)}{C} & -\frac{(1-\alpha)}{RC} \end{bmatrix} \quad (1.25)$$

La matrice d'état devient de la forme suivante :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

Pour la matrice de commande :

$$B = B_{on}\alpha + B_{off}(1 - \alpha) \Rightarrow B = \begin{bmatrix} \frac{\alpha}{L} \\ 0 \end{bmatrix} E + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

La matrice de commande devient de la forme suivante :

$$B = \begin{bmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \alpha \quad (1.28)$$

pour la matrice sortie :

$$C = [0 \ 1] \quad (1.29)$$

La représentation d'état devient de la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \alpha \quad (1.30)$$

$$y = [0 \ 1] \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

## 1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé la modélisation du convertisseur BUCK, qui constitue une étape essentielle pour la commande des systèmes. Il est impératif de valider cette représentation avant de procéder à la synthèse de la loi de commande. Le choix du modèle utilisé dans cette synthèse nous facilite la tâche et nous assure de la pertinence de notre approche. Nous présenterons dans le chapitre suivant la commande par la méthode de LYAPUNOV.

# Commande Basée sur la Fonction de LYAPUNOV

## Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>Conception de Commande Non Linéaire</b>	<b>13</b>
2.2.1	Systèmes non linéaires	13
2.2.2	Commande des systèmes non linéaires	13
<b>2.3</b>	<b>Commande Basée sur la Fonction de LYAPUNOV pour les Systèmes Non Linéaires</b>	<b>14</b>
2.3.1	Historique	14
2.3.2	Méthode de LYAPUNOV	15
2.3.3	Tâches typiques de la commande basée sur la fonction de LYAPUNOV	15
2.3.4	Domaines d'application de la commande basée sur la fonction de LYAPUNOV	16
<b>2.4</b>	<b>Application de la Méthode de LYAPUNOV au Convertisseur BUCK</b>	<b>16</b>
2.4.1	Choix de la fonction de LYAPUNOV	16
2.4.2	Synthèse de la loi de commande pour le convertisseur BUCK	19
<b>2.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>19</b>

---

## 2.1 Introduction

Le chapitre de notre étude se concentre sur la commande basée sur la fonction de LYAPUNOV, une approche de commande non linéaire largement utilisée pour les systèmes dynamiques. Ce chapitre vise à présenter les principes fondamentaux de cette méthode et à explorer son application spécifique au convertisseur BUCK.

Dans la première partie de ce chapitre, nous aborderons la conception de la commande non linéaire. Nous expliquerons les caractéristiques des systèmes non linéaires et les défis associés à leur commande.

Ensuite, nous discuterons de la commande des systèmes non linéaires en général. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous concentrerons sur la commande basée sur la fonction de LYAPUNOV pour les systèmes non linéaires. Nous commencerons par un bref historique de cette méthode et ses développements clés.

Ensuite, nous présenterons la méthode de LYAPUNOV elle-même, en expliquant les concepts de stabilité et de fonction de LYAPUNOV. Nous discuterons également des tâches typiques de la commande basée sur la fonction de LYAPUNOV, telles que la stabilisation, la régulation et le suivi de trajectoire. Nous explorerons ensuite les domaines d'application de la commande basée sur la fonction de LYAPUNOV.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous appliquerons la méthode de LYAPUNOV au convertisseur BUCK. Nous discuterons du choix approprié de la fonction de LYAPUNOV pour le convertisseur BUCK et expliquerons comment concevoir une commande non linéaire en utilisant cette méthode.

## 2.2 Conception de Commande Non Linéaire

### 2.2.1 Systèmes non linéaires

Un système non linéaire est un système dont le comportement ne peut pas être décrit par une équation linéaire. Contrairement aux systèmes linéaires, les systèmes non linéaires ne sont pas homogènes, c'est-à-dire que l'effet d'une entrée donnée sur la sortie ne dépend pas uniquement de la magnitude de cette entrée, mais peut également dépendre de l'état actuel du système [11]. Les systèmes non linéaires peuvent être très complexes, car les relations entre les entrées et les sorties peuvent être très difficiles à décrire mathématiquement.

En général, les systèmes non linéaires sont modélisés à l'aide d'équations différentielles non linéaires, ce qui rend leur analyse et leur conception de commande plus difficiles que pour les systèmes linéaires. Les systèmes non linéaires sont couramment rencontrés dans de nombreux domaines, tels que l'ingénierie, la physique, la biologie, l'économie, etc... Les exemples incluent les systèmes électriques non linéaires, tels que les convertisseurs de puissance, les systèmes mécaniques non linéaires, tels que les oscillateurs et les systèmes biologiques non linéaires, tels que les modèles de croissance des populations [10]. En raison de leur complexité, les méthodes de commande pour les systèmes non linéaires sont souvent basées sur des approches telles que la commande basée sur la fonction de LYAPUNOV, la commande par retour d'état non linéaire, la commande prédictive et la commande adaptative, etc.. [12].

### 2.2.2 Commande des systèmes non linéaires

La commande d'un système consiste en un ensemble d'opérations automatiques qui permettent de guider un processus d'un état initial à un état désiré représenté par le signal de référence  $y_d(t)$ . Lorsqu'un système est commandé, il est confronté à diverses perturbations et variations des paramètres, telles que les frottements, les influences du vent, le bruit de mesure, etc. Ces facteurs externes peuvent affecter la réponse du système et introduire des variations indésirables. La figure 2.1 fournit une représentation visuelle de ces influences. L'objectif de la commande d'un système non linéaire est d'atteindre plusieurs performances essentielles. Tout d'abord, la stabilité est primordiale pour assurer que le système ne présente pas de comportement instable. La robustesse se réfère à la capacité du système à maintenir ses performances face à des variations ou des perturbations dans les conditions de fonctionnement. La rapidité est la capacité du système à atteindre rapidement la consigne et à répondre aux changements. Enfin, la précision est la capacité du système à suivre la consigne avec une erreur minimale [13].

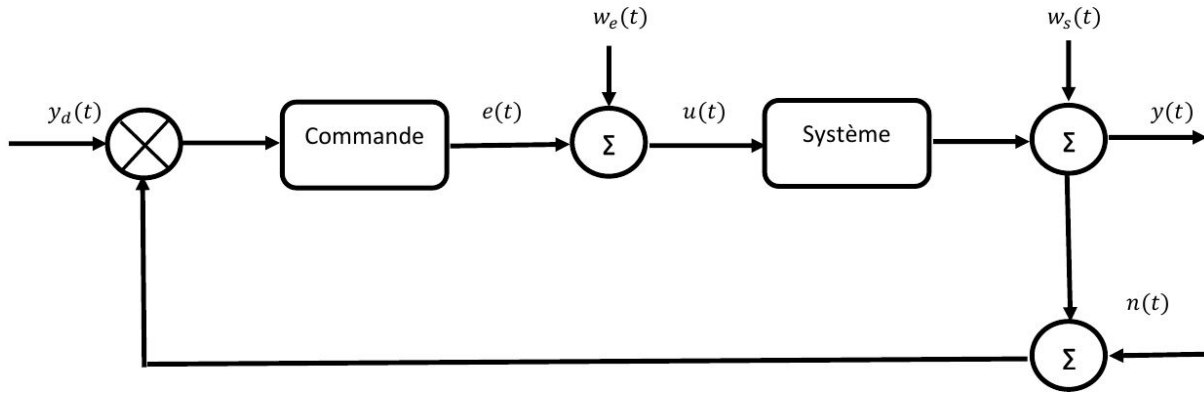


FIGURE 2.1 – Schéma de principe du commande d'un système non linéaire.

Différents signaux sont utilisés, nous avons :

- Le signal de référence  $y_d(t)$  qui représente la consigne ou le signal de référence que l'on souhaite atteindre.
- Le signal de sortie  $y(t)$  est la réponse du système à cette consigne.
- L'erreur de suivi  $e(t)$  est calculée en comparant le signal de sortie  $y(t)$  à la consigne  $y_d(t)$ .
- Le signal de commande  $u(t)$  est généré par le régulateur ou le contrôleur du système.
- Les perturbations de commande  $w_e(t)$  se réfèrent aux variations indésirables ou imprévues dans le signal de commande  $u(t)$ .
- Les perturbations de sortie  $w_s(t)$  sont les variations indésirables ou imprévues dans le signal de sortie  $y(t)$ .
- Le bruit de mesure  $n(t)$  représente les perturbations aléatoires ou indésirables qui sont introduites lors de la mesure du signal de sortie  $y(t)$ .

## 2.3 Commande Basée sur la Fonction de LYAPUNOV pour les Systèmes Non Linéaires

### 2.3.1 Historique

La méthode de LYAPUNOV, également connue sous le nom de méthode des fonctions de LYAPUNOV, a été développée par le mathématicien russe Alexandre LYAPUNOV en 1892 [14]. Cette méthode est largement utilisée en théorie du contrôle et en dynamique des systèmes pour analyser la stabilité et concevoir des lois de commande. Le concept clé de la méthode de LYAPUNOV repose sur l'utilisation de fonctions de LYAPUNOV, qui sont des fonctions scalaires positives définies sur l'espace d'état du système. Ces fonctions permettent d'évaluer la stabilité d'un système dynamique en mesurant la croissance ou la diminution de l'énergie du système le long des trajectoires. LYAPUNOV a formulé le critère de stabilité basé sur sa fonction éponyme : si une fonction de LYAPUNOV peut être trouvée pour laquelle sa dérivée le long des trajectoires du système est strictement négative (ou nulle), alors le système est stable. Ce critère de stabilité est connu sous le nom de critère de stabilité de LYAPUNOV. Au fil des années, la méthode de LYAPUNOV a été étendue pour traiter des systèmes non linéaires, des systèmes avec des contraintes, des systèmes incertains, etc... . Des techniques avancées ont été développées pour

trouver des fonctions de LYAPUNOV adéquates et pour concevoir des lois de commande basées sur la méthode de LYAPUNOV. Aujourd'hui, la méthode de LYAPUNOV reste une approche fondamentale et largement utilisée dans la conception de contrôleurs pour garantir la stabilité, la performance et la robustesse des systèmes dynamiques.

### 2.3.2 Méthode de LYAPUNOV

La méthode de LYAPUNOV pour les systèmes non linéaires est une approche utilisée pour analyser la stabilité des systèmes dynamiques non linéaires. Elle repose sur l'utilisation de fonctions de LYAPUNOV, qui sont des fonctions scalaires définies positives sur l'espace d'état du système [11]. Plus précisément, si une fonction de LYAPUNOV  $V(x)$  est définie pour un système dynamique, elle doit satisfaire deux conditions :

$$\begin{cases} V(x) > 0 \text{ pour } \forall x \neq x_e \text{ telle que } V(x): D \subset R^n \longrightarrow R \\ V(x_e) = 0 \text{ pour } x = x_e. \\ \dot{V}(x) \leq 0 \text{ pour } \forall x \neq x_e. \end{cases} \quad (2.1)$$

En d'autres termes, si la fonction de LYAPUNOV est positive pour toutes les valeurs des variables d'état, cela signifie que le système est stable. Si la dérivée temporelle de la fonction de LYAPUNOV est négative pour toutes les valeurs des variables d'état, cela signifie que les perturbations du système diminuent au fil du temps, ce qui implique également que le système est stable. La méthode de LYAPUNOV est très utile pour prouver la stabilité de systèmes non linéaires complexes. Cependant, il est important de noter que la méthode de LYAPUNOV ne fournit pas nécessairement une solution au problème de commande [12]. Elle permet seulement de prouver la stabilité du système. Pour concevoir une loi de commande efficace pour un système donné, il est souvent nécessaire d'utiliser des techniques plus avancées telles que la commande par retour d'état

### 2.3.3 Tâches typiques de la commande basée sur la fonction de LYAPUNOV

Les tâches typiques de la commande basée sur la fonction de LYAPUNOV incluent [11, 15] :

- Stabilité : concevez un contrôleur à l'aide de la fonction de LYAPUNOV pour stabiliser le système dynamique, en veillant à ce que la trajectoire converge vers l'état d'équilibre souhaité.

- Suivi de trajectoire : concevez un contrôleur qui permet à un système dynamique de suivre avec précision une trajectoire de référence prédéfinie, en utilisant la commande basée sur la fonction de LYAPUNOV pour réguler l'erreur de suivi.

- Contrôle adaptatif : Utiliser la commande basée sur la fonction de LYAPUNOV pour concevoir un contrôleur adaptatif qui ajuste automatiquement ses paramètres en réponse aux modifications des paramètres système ou de l'environnement.

- Contrôle de la vitesse : Concevoir un contrôleur qui régule la vitesse d'un système dynamique, en utilisant le contrôle basée sur la fonction de LYAPUNOV pour maintenir la vitesse à une valeur désirée malgré les perturbations externes.

- Contrôle de la position : Concevoir un contrôleur qui permet de réguler la position d'un système dynamique, en utilisant le contrôle basée sur la fonction de LYAPUNOV pour maintenir

la position à une valeur cible malgré les perturbations et les changements des conditions initiales.

Ces tâches sont généralement réalisées en utilisant les principes et les méthodes de la théorie du contrôle non linéaire et de la commande basée sur la fonction de LYAPUNOV.

### 2.3.4 Domaines d'application de la commande basée sur la fonction de LYAPUNOV

La commande basée sur la fonction de LYAPUNOV trouve des applications dans de nombreux domaines, notamment [11, 15] :

- Robotique : La commande basée sur la fonction de LYAPUNOV est utilisée pour le contrôle de robots manipulateurs, mobiles et humanoïdes, permettant d'atteindre des mouvements précis, d'assurer la stabilité et d'effectuer des tâches complexes .

- Systèmes électriques : Elle est utilisée dans la régulation de la tension et de la fréquence dans les réseaux électriques, le contrôle de la puissance dans les convertisseurs électroniques, ainsi que dans la commande des moteurs électriques.

- Systèmes de contrôle de processus : La commande basée sur la fonction de LYAPUNOV est appliquée dans l'industrie pour la régulation des procédés chimiques, la commande des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation , ainsi que dans le contrôle des systèmes de production d'énergie.

- Véhicules autonomes : Elle est utilisée pour le contrôle des véhicules autonomes tels que les voitures, les drones et les robots mobiles, permettant la navigation, le suivi de trajectoire, l'évitement d'obstacles et la gestion des interactions avec l'environnement.

- Systèmes de communication : La commande basée sur la fonction de LYAPUNOV est appliquée pour améliorer la qualité de transmission des signaux dans les systèmes de communication sans fil, en adaptant la puissance d'émission, l'allocation des ressources et les stratégies de transmission.

- Systèmes de contrôle du mouvement : Elle est utilisée pour le contrôle de mouvement des prothèses, des exosquelettes et des dispositifs d'assistance, permettant d'améliorer la mobilité et la réadaptation des personnes atteintes de handicap

## 2.4 Application de la Méthode de LYAPUNOV au Convertisseur BUCK

### 2.4.1 Choix de la fonction de LYAPUNOV

A partir de équation (1.30) ; le modèle de commutation instantanée du convertisseur DC-DC.

Il est décrit comme :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L}V_c + \frac{E}{L}\alpha \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{RC}V_c \end{cases} \quad (2.2)$$

Le vecteur espace  $x$  de l'état du système comprend l'inducteur mesuré courant  $i_L$  et la tension

de sortie  $V_c$  :

$$x = [i_L \ V_c]^T \quad (2.3)$$

Pour assurer zéro erreur d'état stable dans la tension de sortie  $V_c$  de sa valeur de référence  $V_{cref}$ , équation (2.2) est ensuite augmenté par variable d'état supplémentaire  $x_1$  qui représente l'intégrale de la tension de sortie  $V_c$ , le modèle d'état-espace non linéaire augmenté. Il est ensuite donné par :

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = V_c \\ \frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L}V_c + \frac{E}{L}\alpha \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{RC}V_c \end{cases} \quad (2.4)$$

Le vecteur d'erreur comprend l'intégrale de la tension de sortie erreur de traçage  $e_1$ , l'erreur de suivi de la tension  $e_2$  et la erreur de suivi actuelle  $e_3$  qui sont définies comme :

$$\begin{cases} e_1 = \int V_c dt - \int V_{cref} dt \\ e_2 = V_c - V_{cref} \\ e_3 = i_L - i_{Lref} \end{cases} \quad (2.5)$$

D'après le système d'équations (2.5), les dérivés du temps des erreurs son dérivé comme

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = V_c - V_{cref} = e_2 \\ \dot{e}_2 = \dot{V}_c \\ \dot{e}_3 = \dot{i}_L - \dot{i}_{Lref} \end{cases} \quad (2.6)$$

Pour le convertisseur BUCK, une fonction de LYAPUNOV peut être choisie de la forme suivante :

$$V(e) = V_1 + V_2 + V_3$$

La fonction de LYAPUNOV  $V(e)$  est conçue comme :

$$\begin{cases} V_1 = e_1 \\ V_2 = e_2 + \lambda_1 e_1 \\ V_3 = e_3 \end{cases} \quad (2.7)$$

D'après le système d'équations ( 2.7 ), la dérivé du tempe la fonction de LYAPUNOV  $V(e)$  est dérivé comme :

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{V}_2 = \dot{e}_2 + \lambda_1 \dot{e}_1 \\ \dot{V}_3 = \dot{e}_3 \end{cases} \quad (2.8)$$

Pour dire que cette fonction est une fonction candidat de LYAPUNOV, le critère suivant doit être vrai :

$$V\dot{V}^T \leq 0$$

On multiplie les deux systèmes d'équations (2.7) et (2.8), on obtient :

$$\dot{V} = e_1 e_2 + (e_2 + \lambda_1 e_1)(\dot{e}_2 + \lambda_1 \dot{e}_1) + e_3 \dot{e}_3 \quad (2.9)$$

En ajoutant  $(\lambda_1 e_1 - \lambda_1 e_1)$  pour l'équation(2.9) ; on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e_1(e_2 + \lambda_1 e_1 - \lambda_1 e_1) + (e_2 + \lambda_1 e_1)(\dot{e}_2 + \lambda_1 \dot{e}_1) + e_3 \dot{e}_3 \\ &= -\lambda_1 e_1^2 + e_1(e_2 + \lambda_1 e_1) + (e_2 + \lambda_1 e_1)(\dot{e}_2 + \lambda_1 \dot{e}_1) + e_3 \dot{e}_3 \\ &= -\lambda_1 e_1^2 + (e_2 + \lambda_1 e_1)(e_1 + \dot{e}_2 + \lambda_1 \dot{e}_1) + e_3 \dot{e}_3 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Suivant les systèmes d'équations (2.6) et (2.4) ; on remplace  $\dot{e}_2$  avec sa valeur, on obtient :

$$\dot{V} = -\lambda_1 e_1^2 + (e_2 + \lambda_1 e_1) \left( e_1 + \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{RC} V_c + \lambda_1 e_2 \right) + e_3 \dot{e}_3$$

D'après le système d'équation ( 2.5), nous trouvons que  $i_L = e_3 + i_{Lref}$  ; on remplace  $i_L$  avec sa valeur, on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\lambda_1 e_1^2 + (e_2 + \lambda_1 e_1) \left( e_1 + \frac{1}{C} (e_3 + i_{Lref}) - \frac{1}{RC} V_c + \lambda_1 e_2 \right) + e_3 \dot{e}_3 \\ &= -\lambda_1 e_1^2 + (e_2 + \lambda_1 e_1) \left( e_1 + \frac{1}{C} i_{Lref} - \frac{1}{RC} V_c + \lambda_1 e_2 \right) + e_3 \left( \frac{1}{C} (e_2 + \lambda_1 e_1) + \dot{e}_3 \right) \end{aligned}$$

Posons :

$$-\lambda_2 (e_2 + \lambda_1 e_1) = e_1 + \frac{1}{C} i_{Lref} - \frac{1}{RC} V_c + \lambda_1 e_2 \quad (2.11)$$

On trouve :

$$\dot{V} = -\lambda_1 e_1^2 - \lambda_2 (e_2 + \lambda_1 e_1)^2 + e_3 \left( \frac{1}{C} (e_2 + \lambda_1 e_1) + \dot{e}_3 \right)$$

D'après les systèmes d'équations (2.6 ) et (2.4) ; on remplace  $\dot{e}_3$  avec sa valeur, on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\lambda_1 e_1^2 - \lambda_2 (e_2 + \lambda_1 e_1)^2 + e_3 \left( \frac{1}{C} (e_2 + \lambda_1 e_1) - \frac{1}{L} V_c + \frac{E}{L} \alpha - i_{Lref} \right) \\ &= -\lambda_1 e_1^2 - \lambda_2 (e_2 + \lambda_1 e_1)^2 + e_3 \left( \frac{1}{C} (e_2 + \lambda_1 e_1) + \frac{1}{L} (-V_c + E\alpha) - i_{Lref} \right) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Posons ;

$$-\lambda_3 e_3 = \frac{1}{C} (e_2 + \lambda_1 e_1) + \frac{1}{L} (-V_c + E\alpha) - i_{Lref} \quad (2.13)$$

Alors

$$\dot{V} = -\lambda_1 e_1^2 - \lambda_2 (e_2 + \lambda_1 e_1)^2 - \lambda_3 e_3^2 \leq 0 \quad \text{avec } \lambda_1, \lambda_2 \text{ et } \lambda_3 \geq 0 \quad (2.14)$$

La dérivée de la fonction LYAPUNOV(2.14) est définie négatif, ce qui confirme la stabilité et la convergence de la stratégie de contrôle non linéaire.

### 2.4.2 Synthèse de la loi de commande pour le convertisseur BUCK

D'après l'équation (2.13), nous trouvons que la loi de commande  $\alpha$  est défini par :

$$\alpha = \frac{L}{E} \left( -\frac{1}{C}(e_2 + \lambda_1 e_1) + \frac{1}{L}V_c + \dot{i}_{Lref} - \lambda_3 e_3 \right) \quad (2.15)$$

A partir de équation (2.11), on peut déduire la forme de  $i_{Lref}$  . On a donc :

$$i_{Lref} = C \left( (-e_1(1 + \lambda_1 \lambda_2) - e_2(\lambda_1 + \lambda_2) + \frac{1}{RC}V_c) \right) \quad (2.16)$$

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré la conception des commandes non linéaires, en mettant l'accent sur la commande des systèmes non linéaires et en appliquant la méthode de LYAPUNOV au convertisseur BUCK. La méthode de LYAPUNOV appliquée au convertisseur BUCK est un exemple concret de l'efficacité de cette approche. Nous présenterons dans le chapitre suivant la modélisation de l'observateur à grand gain et leur stabilité

# Observateur à Grand Gain pour le Convertisseur BUCK

## Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>20</b>
<b>3.2</b>	<b>Observateur</b>	<b>21</b>
<b>3.3</b>	<b>Principe de Fonctionnement</b>	<b>21</b>
3.3.1	Objectif d'observateur	21
3.3.2	Structure d'observateur	22
<b>3.4</b>	<b>Observateur à Grand Gain</b>	<b>23</b>
<b>3.5</b>	<b>Conception de L'observateur à Grand Gain pour le Convertisseur BUCK</b>	<b>24</b>
3.5.1	Stabilité et Convergence de l'observateur à grand gain	26
3.5.2	Observateur dans les coordonnées initiales	27
<b>3.6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>28</b>

---

## 3.1 Introduction

Le chapitre de notre étude se concentre sur l'observateur à grand gain pour le convertisseur BUCK. Les observateurs à grand gain sont des outils importants en commande des systèmes, permettant d'estimer les états non mesurés du système à partir des mesures disponibles. Dans ce chapitre, nous explorerons les principes de fonctionnement des observateurs à grand gain et leur application spécifique au convertisseur BUCK.

Dans la première partie de ce chapitre, nous introduirons les observateurs en général. Nous discuterons du principe de fonctionnement de l'observateur, de leur structure de base et de leur objectif principal. Ensuite, nous concentrerons spécifiquement sur l'observateur à grand gain et nous aborderons la conception de cet observateur. Nous aborderons également la stabilité et la convergence de l'observateur à grand gain. Nous analyserons les critères de stabilité qui garantissent que l'observateur reste stable et produit des estimations précises des états du système. Enfin, nous discuterons de l'utilisation de l'observateur à grand gain dans les coordonnées initiales. Nous expliquerons comment l'observateur peut être adapté pour fonctionner dans les coordonnées initiales du convertisseur BUCK, ce qui facilite la convergence et la précision de l'estimation des états du système.

## 3.2 Observateur

Dans le contexte du contrôle et de l'automatique, un observateur est un dispositif ou un algorithme qui est utilisé pour observer les variables d'état d'un système dynamique à partir des mesures disponibles. L'observateur utilise le modèle mathématique du système et les informations fournies par les capteurs pour calculer des estimations des variables d'état qui ne sont pas directement mesurées [16]. L'objectif principal de l'observateur est de fournir des estimations précises des variables d'état du système, même en présence de bruit, de perturbations ou de mesures incomplètes. Il utilise les équations du modèle dynamique du système, ainsi que les mesures disponibles, pour mettre à jour les estimations des variables d'état à chaque instant. L'observateur peut être conçu de différentes manières, en fonction des spécifications du système et des exigences de performance. L'observateur est largement utilisé dans les systèmes de contrôle et d'automatique, car il permet de surveiller et d'estimer les variables d'état d'un système en temps réel, ce qui est essentiel pour prendre des décisions et ajuster les actions de contrôle en conséquence. Il est souvent utilisé en combinaison avec des régulateurs ou des contrôleurs pour former un système de contrôle complet et efficace.

## 3.3 Principe de Fonctionnement

### 3.3.1 Objectif d'observateur

En général, pour des raisons techniques et économiques, l'état du système n'est pas complètement accessible. En effet, la complexité de la faisabilité technique et Le coût élevé de l'implantation de plusieurs capteurs peut réduire considérablement le nombre d'états mesurés. On peut alors considérer que pour la plupart système, la dimension du vecteur d'état est supérieure à la dimension du vecteur de sortie ( $l < n$ ). Cette considération implique que pour tout instant  $t$ , le vecteur  $x(t)$  ne peut pas être entièrement mesuré ou déduit de la sortie. Cependant, cela dépend s'il est présent, l'état peut être reconstruit à l'aide d'un observateur. Par conséquent, déterminer judicieusement la taille de l'observateur doit pouvoir estimer avec précision et rapidité Valeurs des composantes du vecteur d'état  $x(t)$ . Soit, de façon plus générale, le système dynamique défini par [17] :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3.1)$$

Son état  $x(t)$  est estimé (ou reconstruit) par un système dynamique appelé observateur, dont la structure est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Nz(t) + Qu(t) + Ly(t) \\ w(t) = Fz(t) + Ey(t) \end{cases} \quad (3.2)$$

$x(t), u(t)$  et  $y(t) \in R^n$ , représentent respectivement l'état, l'entrée et la sortie du système.  $z(t) \in R^n$  le vecteur d'état de l'observateur tel qu'il tend à asymptotiquement à  $x(t)$  et  $w(t)$  désignent la sortie du système observateur. Sa structure peut également être représentée par le schéma représenté sur la figure 3.1. Le système dynamique constituant l'observateur doit assurer que l'erreur de reconstruction définie par

$$e(t) = x(t) - z(t) \quad (3.3)$$

Tend asymptotiquement vers zéro, à savoir :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = x(t) - z(t) = 0 \quad (3.4)$$

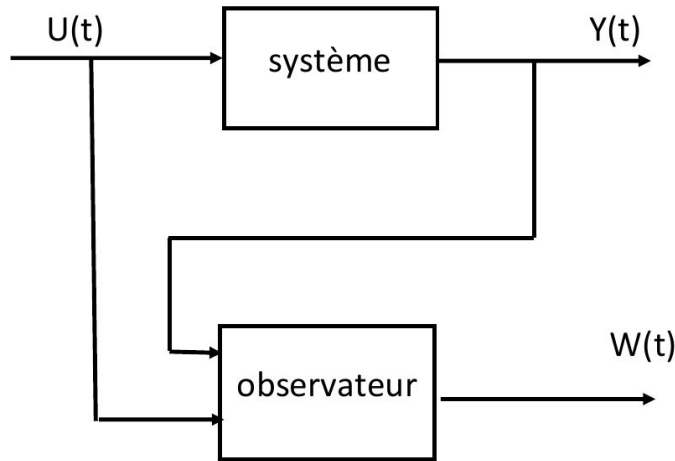


FIGURE 3.1 – Diagramme structurel d'un observateur

### 3.3.2 Structure d'observateur

Pour expliquer le processus général de conception des observateurs, nous allons Les constructions qui reposent sur des observateurs de commande totale. Observateur d'ordre full permet une reconstruction complète du vecteur d'état  $x(t)$ . On note  $z(t)$  la quantité observée correspondant à la sortie du système dynamique composé d'observateurs. Donc, pour une commande complète, nous avons directement  $z(t) = \hat{x}(t)$  où  $\hat{x}(t)$  est une estimation de  $x(t)$ . La structure de l'observateur peut être représentée par la figure 3.2, indiquant Prend la forme suivante [17] :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (3.5)$$

Le terme correctif  $L(y(t) - \hat{y}(t))$  fait apparaître le gain de correction  $L$ , également appelé gain de l'observateur, relatif à l'erreur de la reconstruction de la sortie. On peut aussi écrire l'observateur sous la forme suivante :

$$\dot{\hat{x}}(t) = (A - LC)\hat{x}(t) + Bu(t) + Ly(t)$$

La dynamique de l'erreur de reconstruction, définie par  $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ , peut s'écrire :

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t)$$

A partir de la condition initiale  $e(0) = x(0) - \hat{x}(0)$ , l'évolution de cette erreur d'estimation est telle que :

$$e(t) = \exp[(A - LC)t]e(0)$$

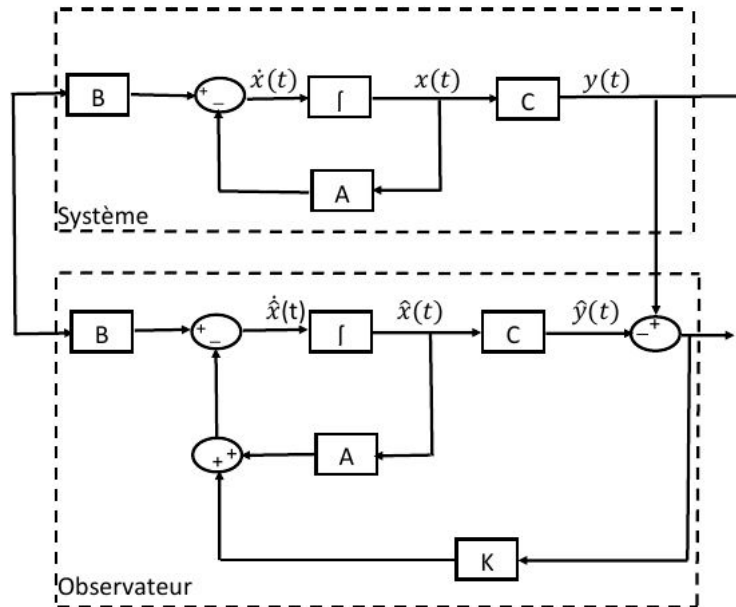


FIGURE 3.2 – Diagramme structurel d'un observateur d'ordre plein

Afin que l'observateur soit asymptotique, il faut que l'erreur d'estimation tende vers 0 lorsque  $t$  augmente. En effet, à  $t = 0$ ,  $e(0) = 0$  car l'état étant inaccessible, on ne peut en général pas choisir  $x(0) = \hat{x}(0)$ . Afin de garantir une convergence asymptotique de l'erreur d'estimation ( $e(t) \rightarrow 0$  pour  $t \rightarrow \infty$ ) et donc un bon fonctionnement de l'observateur, il faut choisir  $L$  de façon judicieuse

### 3.4 Observateur à Grand Gain

L'observateur à grand gain est une technique utilisée en contrôle et en automatique pour estimer les variables d'état d'un système dynamique à partir des mesures disponibles. Il s'agit d'un type spécifique d'observateur conçu avec un grand gain, ce qui lui permet de réagir rapidement aux variations et aux perturbations du système [18]. L'objectif principal de l'observateur à grand gain est de fournir des estimations précises et rapides des variables d'état, même en présence de bruit ou de mesures incomplètes. Il fonctionne en comparant les mesures réelles du système avec les estimations calculées par l'observateur, et en utilisant un grand gain pour réduire l'erreur entre les deux. L'utilisation d'un grand gain permet à l'observateur de réagir rapidement aux changements du système, ce qui peut être bénéfique dans des situations où une estimation précise et en temps réel des variables d'état est essentielle. Cependant, il convient de noter que l'utilisation d'un gain trop élevé peut rendre l'observateur plus sensible au bruit et aux perturbations, ce qui peut entraîner des estimations moins précises. La conception de l'observateur à grand gain repose sur des principes mathématiques tels que la théorie de l'observation et l'analyse des systèmes linéaires. Des techniques d'optimisation et de réglage des paramètres sont souvent utilisées pour ajuster le gain de l'observateur et optimiser ses performances en fonction des exigences spécifiques du système. En résumé, l'observateur à grand gain est une technique d'estimation utilisée en contrôle et en automatique pour estimer rapidement et précisément les variables d'état d'un système dynamique à partir de mesures disponibles, en utilisant un grand gain pour réagir rapidement aux variations du système.

### 3.5 Conception de L'observateur à Grand Gain pour le Convertisseur BUCK

A partir l'équation (1.30) :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \alpha \quad (3.6)$$

D'où

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L}V_c + \frac{E}{L}\alpha \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{RC}V_c \end{cases} \quad (3.7)$$

On a :

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Et

$$\begin{cases} z_1 = i_L \\ z_2 = -\frac{1}{L}V_c \end{cases} \quad (3.9)$$

Donc

$$\begin{cases} i_L = z_1 \\ V_c = -Lz_2 \end{cases} \quad (3.10)$$

Et

$$\begin{cases} \frac{dz_1}{dt} = \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dz_2}{dt} = -L\frac{dV_c}{dt} \end{cases} \quad (3.11)$$

On remplace (3.10) et (3.11) dans (1.30) :

$$\begin{cases} \frac{dz_1}{dt} = z_2 + \frac{E}{L}\alpha \\ -L\frac{dz_2}{dt} = \frac{1}{C}z_1 + \frac{L}{RC}z_2 \end{cases} \quad (3.12)$$

Donc

$$\begin{cases} \frac{dz_1}{dt} = z_2 + \frac{E}{L}\alpha \\ \frac{dz_2}{dt} = -\frac{1}{LC}z_1 + -\frac{1}{RC}z_2 \end{cases} \quad (3.13)$$

On posons que :

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Et

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Et

$$F(z, \alpha) = \begin{bmatrix} \frac{E}{L}\alpha \\ -\frac{1}{LC}z_1 - \frac{1}{RC}z_2 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Le système non linéaire (3.13) se transforme à

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + F(z, \alpha) \\ y = Cz \end{cases} \quad (3.17)$$

Et  $C = [0 \ 1]$  est le vecteur de sortie, Le système suivant est :

$$\dot{z} = A\hat{z} + F(z, \alpha) + S_\vartheta^{-1}C^T C(z - \hat{z}) \quad (3.18)$$

Avec  $S_\vartheta$  est la matrice définie par :

$$S_\vartheta = S_\vartheta^T = \begin{bmatrix} \vartheta^{-1} & -\vartheta^{-2} \\ -\vartheta^{-2} & 2\vartheta^{-3} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Avec  $\vartheta > 0$  la seule équation algébrique de fonction LYAPUNOV suivant :

$$\vartheta S_\vartheta + A^T S_\vartheta + S_\vartheta A = C^T C \quad (3.20)$$

$S_\vartheta^{-1}C^T$  : est le gain d'observation.

**Hypothèses simplificatrices :**

On imposons les hypothèses simplificatrices suivantes :

**Hypothèse 1 :** La fonction est globalement *Lipschitzien* par rapport à  $z$  uniformément par rapport à  $\alpha$

$$\|F(z, \alpha) - F(\hat{z}, \alpha)\| \leq k\|z - \hat{z}\|$$

**Hypothèse 2 :**

$$|e^T S_\vartheta \tilde{F}| \leq \|e^T\| \|S_\vartheta\| \|\tilde{F}\|$$

**Hypothèse 3 :**

$$\lambda_{\min}(S_\vartheta) \|e\|^2 \leq e^T S_\vartheta e$$

**Hypothèse 4 :**

$$\vartheta > 2k \frac{\lambda_{\max}(S_\vartheta)}{\lambda_{\min}(S_\vartheta)} \text{ avec } k > 0$$

Avec :  $\lambda_{\min}(S_\vartheta)$  et  $\lambda_{\max}(S_\vartheta)$  sont les valeurs propres minimale et maximale

### 3.5.1 Stabilité et Convergence de l'observateur à grand gain

On prend l'erreur en considération, Alors la dynamique est donnée par :

$$e = z - \hat{z} \Rightarrow \dot{e} = \dot{z} - \dot{\hat{z}} \quad (3.21)$$

D'où :

$$\begin{aligned} \dot{e} &= Az + F(z, \alpha) - A\hat{z} - F(\hat{z}, \alpha) - S_{\vartheta}^{-1}C^TC(z - \hat{z}) \\ &= A(z - \hat{z}) + F(z, \alpha) - F(\hat{z}, \alpha) - S_{\vartheta}^{-1}C^TC(z - \hat{z}) \end{aligned}$$

On posons :

$$\tilde{F} = F(z, \alpha) - F(\hat{z}, \alpha)$$

Donc ;

$$\begin{aligned} \dot{e} &= A(z - \hat{z}) - S_{\vartheta}^{-1}C^TC(z - \hat{z}) + \tilde{F} \\ &= Ae - S_{\vartheta}^{-1}C^TCe + \tilde{F} \\ &= (A - S_{\vartheta}^{-1}C^TC)e + \tilde{F} \end{aligned}$$

On considérons l'équation algébrique de fonction LYAPUNOV suivant :

$$V(e) = e^T S_{\vartheta} e > 0$$

On dérive cet équation ; On trouve :

$$\dot{V}(e) = \dot{e}^T S_{\vartheta} e + e^T S_{\vartheta} \dot{e}$$

Donc ;

$$\begin{aligned} \dot{V}(e) &= \left[ (A - S_{\vartheta}^{-1}C^TC)e + \tilde{F} \right]^T S_{\vartheta} e + e^T S_{\vartheta} \left[ (A - S_{\vartheta}^{-1}C^TC)e + \tilde{F} \right] \\ &= e^T A^T S_{\vartheta} e - e^T S_{\vartheta}^{-1}C^TC S_{\vartheta} e + \tilde{F}^T S_{\vartheta} e + e^T S_{\vartheta} A e - e^T S_{\vartheta} S_{\vartheta}^{-1}C^TC e + e^T S_{\vartheta} \tilde{F} \end{aligned}$$

On prend  $(e^T e)$  en facteur

$$\dot{V}(e) = e^T [A^T S_{\vartheta} + S_{\vartheta} A] e - 2e^T C^T C e + 2e^T S_{\vartheta} \tilde{F}$$

Et

$$S_{\vartheta} S_{\vartheta}^{-1} = I$$

$I \Rightarrow$  la matrice identique

D'après l'équation (3.20) ; on trouve :

$$A^T S_{\vartheta} + S_{\vartheta} A = C^T C - \vartheta S_{\vartheta}$$

Donc

$$\dot{V}(e) = e^T [-\vartheta S_{\vartheta} + C^T C e] - 2e^T C^T C e + 2e^T S_{\vartheta} \tilde{F}$$

Et

$$\dot{V}(e) = -\vartheta e^T S_{\vartheta} e + e^T C^T C e - 2e^T C^T C e + 2e^T S_{\vartheta} \tilde{F} \quad (3.22)$$

On ajoute le terme  $e^T C^T C e$  à l'équation(3.22) ; On trouve :

$$\dot{V}(e) \leq -\vartheta e^T S_{\vartheta} e + 2e^T \tilde{F} S_{\vartheta}$$

Suivant hypothèse 2 :

$$\begin{aligned}\dot{V}(e) &\leq -\vartheta V(e) + 2|e^T S_\vartheta \tilde{F}| \\ &\leq -\vartheta V(e) + 2 \| e^T \| \| S_\vartheta \| \| \tilde{F} \|\end{aligned}$$

D'après hypothèse 1 :

$$\|S_\vartheta\| = \|F(z, \alpha) - F(\hat{z}, \alpha)\| \leq \|z - \hat{z}\|$$

On aura :

$$\dot{V}(e) \leq -\vartheta V(e) + 2k \|e^T\| \|S_\vartheta\| \|z - \hat{z}\|$$

D'après l'équation (3.21) :

$$\begin{aligned}\dot{V}(e) &\leq -\vartheta V(e) + 2k \|e^T\| \|S_\vartheta\| \|e\| \\ &\leq -\vartheta V(e) + 2k \|e\|^2 \|S_\vartheta\|\end{aligned}$$

D'après hypothèse 3; On trouve :

$$\|e\|^2 \leq \frac{V(e)}{\lambda_{\min}(S_\vartheta)}$$

Donc ;

$$\dot{V}(e) \leq -\vartheta V(e) + 2k \frac{V(e)}{\lambda_{\min}(S_\vartheta)} \|S_\vartheta\|$$

On posons ;

$$\|S_\vartheta\| = \lambda_{\max}(S_\vartheta)$$

Donc :

$$\begin{aligned}\dot{V}(e) &\leq -\vartheta V(e) + 2k \frac{V(e)}{\lambda_{\min}(S_\vartheta)} \lambda_{\max}(S_\vartheta) \\ &\leq -\vartheta V(e) + 2k \frac{\lambda_{\max}(S_\vartheta)}{\lambda_{\min}(S_\vartheta)} V(e) \\ &\leq \left( -\vartheta + 2k \frac{\lambda_{\max}(S_\vartheta)}{\lambda_{\min}(S_\vartheta)} \right) V(e)\end{aligned}$$

La stabilité de l'observateur est garantit par (Hypothèse 4); Le système est stable si :

$$\vartheta > 2k \frac{\lambda_{\max}(S_\vartheta)}{\lambda_{\min}(S_\vartheta)}$$

Ce qui garantit la convergence de l'observateur proposé

### 3.5.2 Observateur dans les coordonnées initiales

Notons que l'observation  $\hat{i}_L$  et  $\hat{V}_c$  de l'état  $i_L$  et  $V_c$  de (1.30), est obtenue par :

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

L'observateur a exprimé un  $\hat{i}_L$  et  $\hat{V}_c$  est alors donné par :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_L}{dt} \\ \frac{d\hat{V}_c}{dt} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \alpha + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \vartheta^{-1} & -\vartheta^{-2} \\ -\vartheta^{-2} & 2\vartheta^{-3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} (V_c - \hat{V}_c) \\ \begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_L}{dt} \\ \frac{d\hat{V}_c}{dt} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \alpha + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2\vartheta & -\vartheta^2 \\ -\vartheta^2 & 2\vartheta^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} (V_c - \hat{V}_c) \quad (3.24) \end{aligned}$$

On trouve :

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_L}{dt} \\ \frac{d\hat{V}_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \alpha + \begin{bmatrix} \vartheta^2 \\ -\frac{1}{L}\vartheta^3 \end{bmatrix} (V_c - \hat{V}_c) \quad (3.25)$$

Notre observateur est :

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_L}{dt} = -\frac{1}{L}\hat{V}_c + \frac{E}{L}\alpha + \vartheta^2(V_c - \hat{V}_c) \\ \frac{d\hat{V}_c}{dt} = \frac{1}{C}\hat{i}_L - \frac{1}{RC}\hat{V}_c - \frac{1}{L}\vartheta^3(V_c - \hat{V}_c) \end{cases} \quad (3.26)$$

L'observateur est une copie du modèle, plus un terme correctif qui est explicitement donné. De plus, son réglage se fait par le choix d'un seul paramètre  $\vartheta$ .

### 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons commencé par définir un observateur, ainsi que leur principe de fonctionnement qui repose sur la comparaison entre les mesures réelles du système et les estimations générées par l'observateur, en mettant particulièrement l'accent sur l'observateur à grand gain, et leur conception, leur principe de fonctionnement est basé sur l'idée d'amplifier les écarts entre les mesures réelles et les estimations. Nous présenterons dans le chapitre suivant la simulation d'un convertisseur DC-DC et l'observateur à grand gain.

# Simulation et Résultats

## Sommaire

---

4.1	Introduction . . . . .	29
4.2	Paramètres du Système . . . . .	29
4.3	Simulation de Commande Basée sur la Fonction de LYAPUNOV du Convertisseur BUCK . . . . .	31
4.4	Simulation de L’observateur à Grand Gain pour le Convertisseur BUCK . . . . .	33
4.5	Conclusion . . . . .	35

---

## 4.1 Introduction

Le chapitre intitulé les simulations et les résultats constitue une étape essentielle de l’évaluation des performances de la commande basée sur la fonction de LYAPUNOV et de l’observateur à grand gain pour le convertisseur BUCK. Ce chapitre est étroitement lié aux chapitres précédents, à savoir le chapitre 2 sur la commande basée sur la fonction de LYAPUNOV et le chapitre 3 sur l’observateur à grand gain pour le convertisseur BUCK. L’objectif de ce chapitre est de présenter les paramètres du système, les simulations réalisées et les résultats obtenus pour ces deux approches de commande. Nous soulignerons l’importance de la simulation et des résultats pour évaluer l’efficacité des approches de commande étudiées.

## 4.2 Paramètres du Système

Les paramètres du système sont présentés dans Tableau (4.1) :

Paramètre	Signification	Valeur
$E$	Tension d'entrée	24 V
$V_s$	Tension de sortie	18 V
$L$	Inducteur	69 mH
$R$	Charge de résistance	13 $\Omega$
$C$	Condensateur	220 $\mu F$
$f$	Fréquence	100 KHz

TABLE 4.1 – Paramètres du convertisseur BUCK DC-DC [1]

pour assurée la stabilité et la convergence de système contrôlé, une meilleure performance de suivi est assurée par sélectionner les gains idéaux des contrôleurs (les paramètres des contrôleurs proposé :  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  et  $\vartheta$ ) Tableau (4.2)

Paramètre	Valeur
$\lambda_1$	3
$\lambda_2$	2
$\lambda_3$	1
$\vartheta$	1

TABLE 4.2 – Gains des contrôleurs proposés

Nous montrons un diagramme général détaillé de contrôle base sur la fonction de LYAPUNOV avec observateur à grand gain dans la figure 4.1

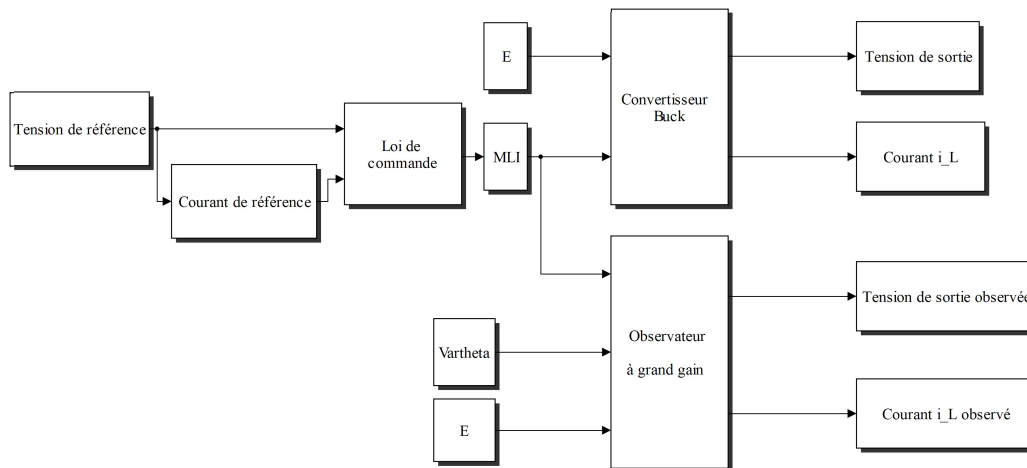


FIGURE 4.1 – Diagramme général de la commande non linéaire pour un convertisseur DC-DC BUCK avec un observateur à grand gain.

**Remarque :**

Le rôle de MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) est de convertir le signal de commande continu provenant de la loi de commande en un signal de commande discontinu approprié pour le convertisseur BUCK.

### 4.3 Simulation de Commande Basée sur la Fonction de LYAPUNOV du Convertisseur BUCK

Comme nous l'avons vu précédemment, la méthode de LYAPUNOV est une approche pour concevoir des lois de commande non linéaires qui garantissent la stabilité du système. Pour le convertisseur BUCK, nous avons utilisé cette méthode pour concevoir une loi de commande non linéaire robuste capable de compenser les incertitudes et les perturbations dans le système. le schéma de simulation est donné par la figure 4.2. Les performances du contrôleur non linéaire développé il sera illustré à l'aide de simulations numériques Matlab/Simulink.

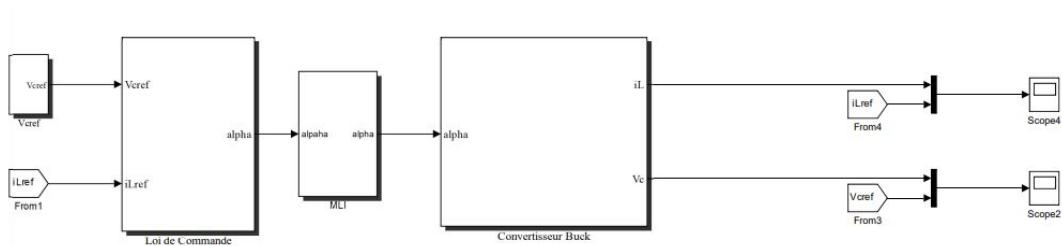


FIGURE 4.2 – Schéma de simulation pour convertisseur BUCK basée sur la fonction de LYAPUNOV

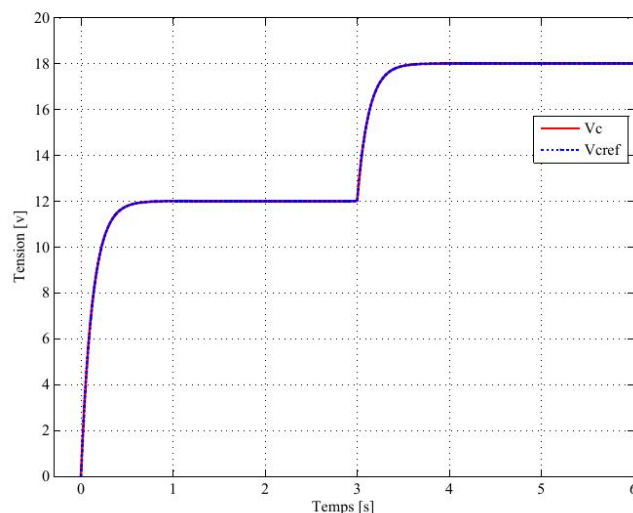
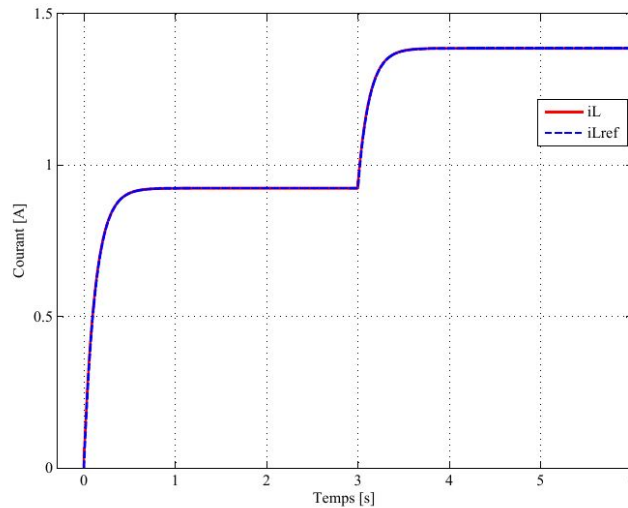


FIGURE 4.3 – Simulation de tension de sortie  $V_c$

FIGURE 4.4 – Simulation de courant d'inductance  $i_L$ 

La figure 4.3 montre l'efficacité du convertisseur BUCK contrôlé par la méthode LYAPUNOV à maintenir une tension de sortie  $V_c$  (courbe en rouge), qui est identique à la tension de référence  $V_{cref}$  (courbe en bleu), L'erreur de tension de sortie est affiché dans la figure 4.5 avec une valeur moyenne  $2.0755 * 10^{-05} V$ . Plus précisément, en appliquant un changement de tension de référence de  $0V$  à  $12V$  à  $t = 0.7s$  puis à  $18 V$  à  $t = 3s$ , On peut remarque que la tension de sortie  $V_c$  suit la référence de manière précise avec une petite oscillation ou début qui se stabilise rapidement. Cette réponse rapide et précise du système indique également une bonne efficacité du contrôleur à suivre les changements de référence en temps réel.

La figure 4.4 illustre la capacité du convertisseur BUCK contrôlé par la méthode LYAPUNOV à suivre un courant de référence  $i_{Lref}$ , comme indiqué par la courbe en bleu. Le courant de sortie  $i_L$  (courbe en rouge) suit de près le courant de référence  $i_{Lref}$ , assurant ainsi une réponse rapide et précise du convertisseur BUCK aux variations de charge. l'erreur de courant d'inductance est affiché dans la figure 4.6 avec une valeur moyenne  $8.4139 * 10^{-04} A$ .

Afin de tester la robustesse du convertisseur BUCK contrôlé par la méthodeLYAPUNOV, des changements de tension de référence ont été appliqués instantanément à des moments précis. Les résultats montrent que le convertisseur BUCK contrôlé par la méthode LYAPUNOV est capable de suivre rapidement ces changements de référence sans dévier significativement de la valeur souhaitée.

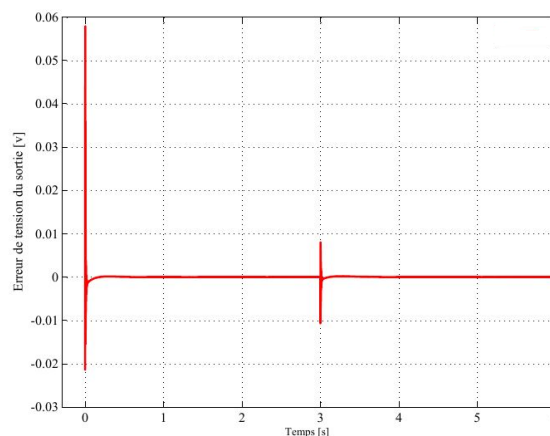


FIGURE 4.5 – Erreur de tension du sortie

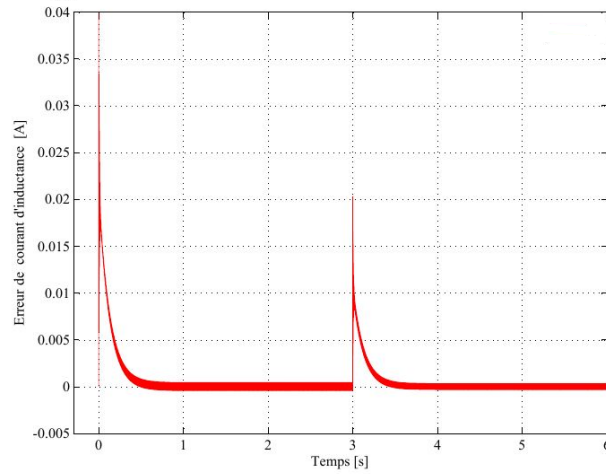


FIGURE 4.6 – Erreur de courant d’inductance

Ces résultats démontrent l’efficacité de la méthode de LYAPUNOV pour la conception de contrôleurs robustes pour les convertisseurs BUCK.

#### 4.4 Simulation de L’observateur à Grand Gain pour le Convertisseur BUCK

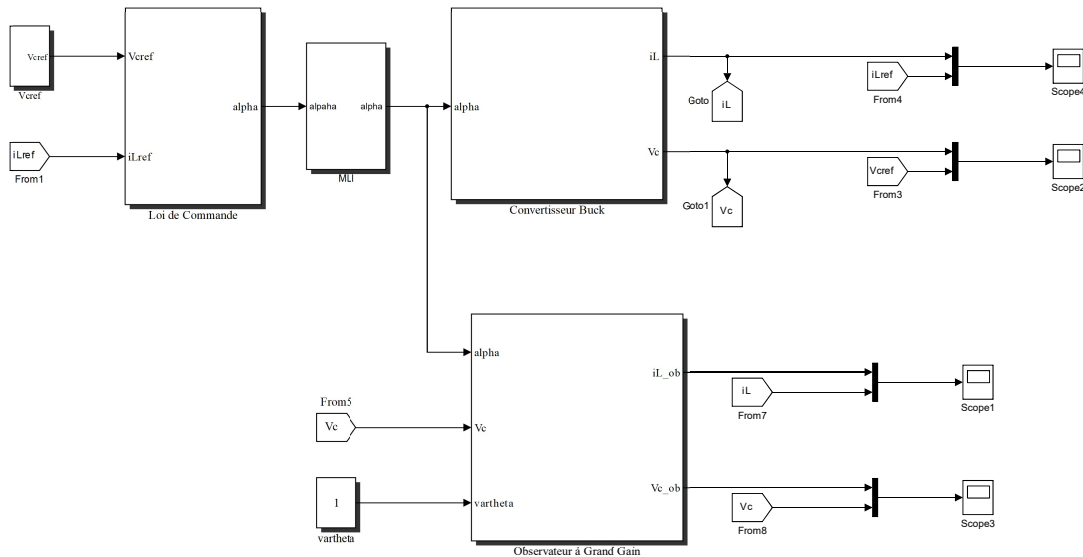
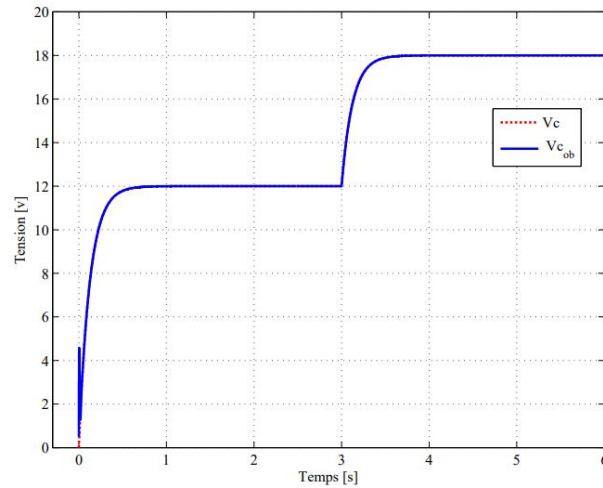
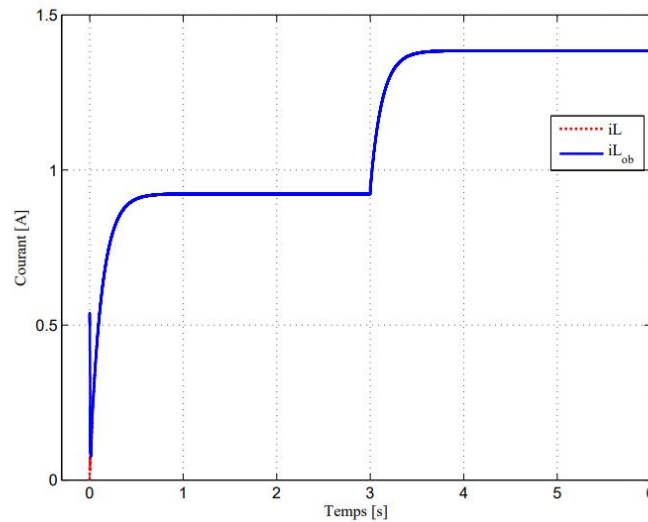


FIGURE 4.7 – Schéma de simulation d’un observateur à grand gain pour le convertisseur BUCK

Dans cette configuration, la tension de référence  $V_{cref}$  et le courant de référence  $i_{Lref}$  sont respectivement la tension  $V_c$  et le courant de contrôle  $i_L$ . La nouvelle tension de sortie et le courant de l’inductance sont considérés comme la tension  $\hat{V}_c$  et le courant  $\hat{i}_L$  observés.

FIGURE 4.8 – Simulation de tension de sortie  $\hat{V}_c$ FIGURE 4.9 – Simulation de courant de sortie  $\hat{i}_L$ 

La figure 4.9 montre les performances du convertisseur BUCK contrôlé par la méthode LYAPUNOV avec un observateur à grand gain.  $\hat{V}_c$  ( courbe en bleu) est également considéré comme la tension de observé qui doit être identique à la tension de contrôle  $V_c$  (courbe rouge) avec un début de faible oscillation qui se stabilise rapidement. L'erreur de tension de sortie est affiché dans la figure 4.10 avec une valeur moyenne 0.0025 V.

De même, la figure 4.8 illustre la capacité du convertisseur BUCK, contrôlé par la méthode LYAPUNOV avec l'ajout d'un observateur à grand gain,  $\hat{i}_L$  ( courbe en bleu) est également considéré comme le courant observé qui suit de près le courant de contrôle  $i_L$ (courbe rouge) avec un départ en basse oscillation qui se stabilise rapidement. L'erreur de courant d'inductance est visualisé dans la figure 4.11 avec une valeur moyenne  $1.6623 * 10^{-04}$  A. Cette configuration garantit une réponse rapide et précise du convertisseur BUCK aux variations de charge.

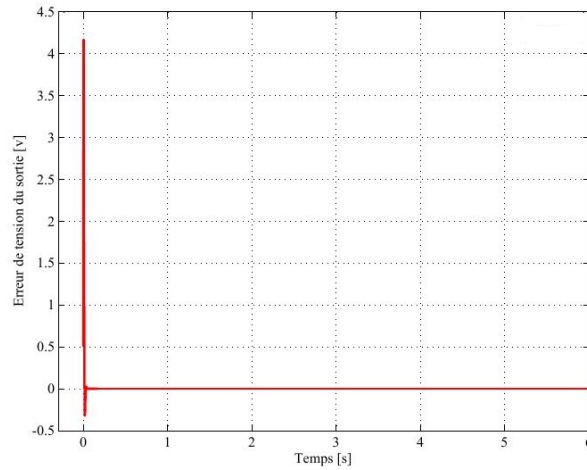


FIGURE 4.10 – Erreur de tension du sortie

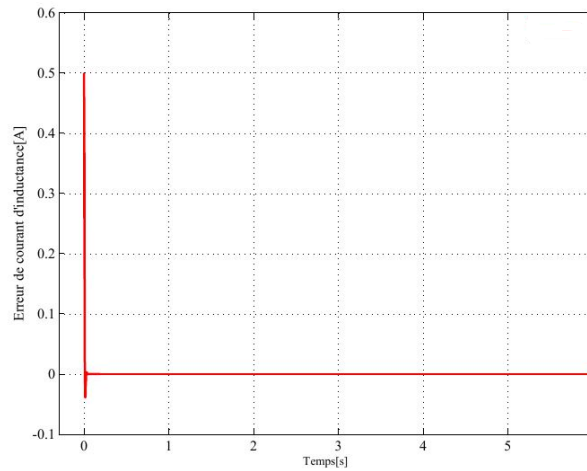


FIGURE 4.11 – Erreur de courant d'inductance

Les résultats de simulation montrent l'efficacité de l'observateur utilisé.

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré la simulation d'un convertisseur DC-DC et l'utilisation d'un observateur à grand gain dans ce contexte. Cela est très important dans les systèmes de régulation de tension. Nous avons d'abord mis en évidence l'importance de la simulation pour évaluer et valider les performances des systèmes de commande avant leur mise en œuvre réelle, cette réactivité précise témoigne de l'efficacité du contrôleur à ajuster en temps réel les variations de référence. L'utilisation d'un observateur à grand gain dans la simulation permet d'estimer avec précision les états inaccessibles du système

# Conclusion Générale

Ce mémoire a présenté une étude détaillée de l'observateur robuste basé sur un contrôleur non-linéaire du convertisseur buck. Les résultats obtenus dans chaque chapitre ont contribué à une meilleure compréhension de ce système

Dans le premier chapitre, nous avons parlé sur les convertisseurs statiques et les convertisseurs DC-DC, on introduit le contexte du convertisseur buck et nous avons également présenté la modélisation mathématique de ce système et leurs modèle d'état .

Le deuxième chapitre, nous avons parlé sur la commande basée sur la fonction de Lyapunov pour les systèmes non linéaires et l'application de cette méthode sur le convertisseur buck .

Le troisième chapitre, nous avons parlé sur l'observateur à grand gain et présenté la conception d'observateur et nous avons présenté le principe du contrôleur non-linéaire et expliqué la structure du système.

Enfin, dans le quatrième chapitre, nous avons évalué les performances de notre commande de convertisseur Buck et de l'observateur robuste à travers des simulations et analysé les résultats obtenus.

En conclusion, ce mémoire a présenté une étude approfondie de l'observateur robuste basé sur un contrôleur non-linéaire. Les résultats obtenus démontrent l'efficacité de cette approche pour observer l'état du système et compenser les perturbations. Les recommandations proposées ouvrent la voie à de nouvelles recherches et à des améliorations supplémentaires dans la conception et le contrôle des convertisseurs de puissance.

# Annexe

1. Bloc simulink de convertisseur Buck :

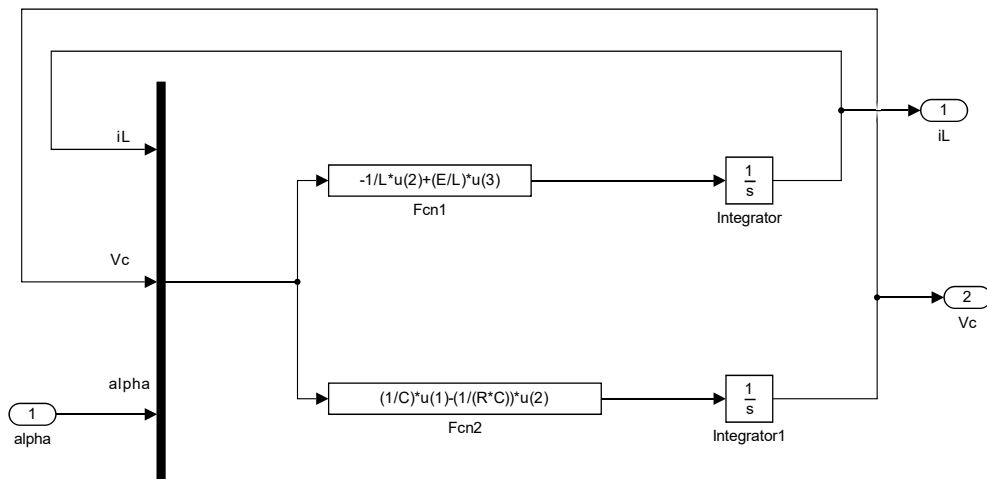


FIGURE 12 – Bloc simulink de convertisseur Buck



## 3. Bloc simulink d'observateur à grand gain

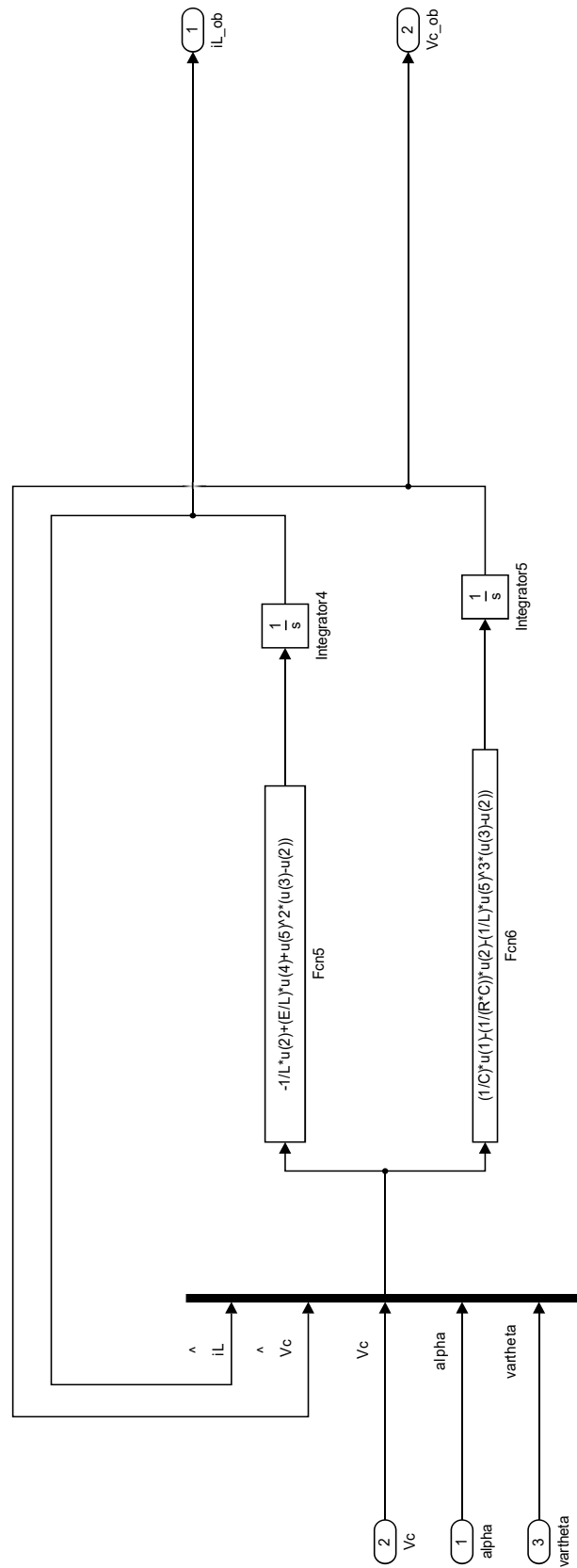


FIGURE 14 – Bloc simulink d'observateur à grand gain

4. Bloc simulink de  $V_{cref}$  :

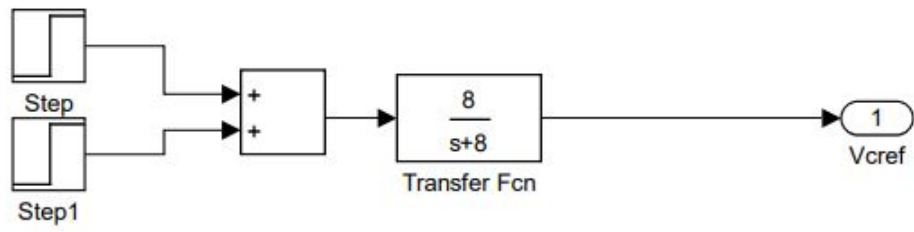


FIGURE 15 – Bloc simulink de  $V_{cref}$

# Bibliographie

- [1] Ahmed Chouya and Kada Boureguig. Linear observer based linearizing control of dc-dc buck converter. *WSEAS Transactions on Power Systems*, 16 :52–60, 2021.
- [2] Hansruedi Bühler. *Convertisseurs statiques*. PPUR presses polytechniques, 1991.
- [3] Ali Emadi, Alireza Khaligh, Zhong Nie, and Young Joo Lee. *Integrated power electronic converters and digital control*. CRC Press, 2017.
- [4] AZEDDINE ZEMOURI. *Etude expérimentale d'un convertisseur DC/DC contrôler par une commande robuste*. PhD thesis, Université de Batna 2, 2014.
- [5] Jonathan HDG Pinto, Guilherme F Avelar, Salatiel C Lobato, Ettore PLB de Aquino, Marcio CBP Rodrigues, Marcelo A Tomin, Pedro G Barbosa, and André A Ferreira. Cascade dc-dc converter modeling developed to supercapacitor energy management system. In *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pages 1–6. IEEE, 2017.
- [6] M Meddah, M Bourahla, and N Bouchetata. Synthèse des convertisseurs statiques dc/ac pour les systèmes photovoltaïques. *Revue des Energies Renouvelables ICESD'11 Adrar*, pages 101–112, 2011.
- [7] Ali NECIB. *Modélisation et Commande d'un Convertisseur Buck via les Modèles Flous de type Takagi-Sugeno*. PhD thesis, 2021.
- [8] Safa Atchoum. Réalisation d'un convertisseur buck-mppt. 2017.
- [9] Yakoub Nettari. *Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC*. PhD thesis, 2018.
- [10] Jean Lévine. Analyse et commande des systèmes non linéaires. *Centre Automatique et Systèmes Ecole des Mines de Paris*, 2004.
- [11] Hassan K Khalil. *Nonlinear systems ; 3rd ed*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002. The book can be consulted by contacting : PH-AID : Wallet, Lionel.
- [12] Abder Rezak Benaskeur. *Aspects de l'application du backstepping adaptatif à la commande décentralisée des systèmes non linéaires*. Thèse PhD, 2002.
- [13] Rahim ALIOUANE and Mohamed Mounib BEN DERRADJI. *Etude et Commande des Systèmes Non-Linéaires : Système Twin Rotor*. PhD thesis, 2015.
- [14] David Landry. Comprendre un écoulement complexe avec le ftle. In *Journal du colloque des étudiants de premier cycle en mathématiques de l'Université Laval*, page 1, 2013.
- [15] Jean-Jacques E Slotine, Weiping Li, et al. *Applied nonlinear control*, volume 199. Prentice hall Englewood Cliffs, NJ, 1991.
- [16] Lazhar BOUDJELLALE. *TECHNIQUES D'OBSERVATION ET DE CONTROLE DYNAMIQUE DU FLUX D'UN MOTEUR ASYNCHRONE : Application à une Commande par Flux Orienté*. PhD thesis, Université Mohamed Khider-Biskra, 2005.

- [17] Benoît Larroque. *Observateurs de systèmes linéaires : application à la détection et localisation de fautes*. PhD thesis, 2008.
- [18] Mohamed BEDBOUDI. *Utilisation d'un observateur à grand gain dans une commande d'une machine asynchrone*. PhD thesis, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, 2013.