



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

# Ecole Nationale Polytechnique

## Département d'Electronique

*Mémoire du MASTER en Electronique*

### *Thème*

*Etude comparative entre les différents types de  
convertisseurs DC-DC*

**Proposé et dirigé par**

**M. C.LARBES**

**Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique**

**Présenté par**

**DAHMANI Mohamed**

*Promotion 2014*

**ENP : 10, Avenue Hacène Badi, El Harrach, Alger**

# Remerciements

Au terme de ce travail,

J'adresse mes remerciements à Monsieur Chérif LARBES Professeur à l'École Nationale Polytechnique, pour l'appui scientifique et pour sa disponibilité durant la préparation de mon projet de fin d'études ainsi que pour tout le savoir qu'ils m'a transmis durant ces deux années.

Je tiens également à remercier Monsieur Rachid ZERGUI docteur à l'École Nationale Polytechnique, de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Je remercie aussi Monsieur M. Mourad HADDADI professeur à l'École Nationale Polytechnique, d'avoir accepté d'examiner et évaluer ce travail.

Je tiens à remercier Mr A.Elhamid LOUKRIZ doctorant à l'École Nationale Polytechnique pour son aide pendant notre réalisation ainsi que Mr Ahmed BENYAHIA ingénieur de Labo d'Electronique et tout les enseignants de l'École Nationale Polytechnique spécialement ceux du département d'Électronique, pour leur encadrement tout au long de notre formation.

## ***Dédicaces***

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents à qui je dois mon parcours jusqu'à présent ;ce travail n'est que l'aboutissement de leurs efforts et leur contribution.*

*A mes chers frères et sœurs et leurs petites familles à qui je souhaite beaucoup plus de succès, sans oublier mes très chers amis.*

*Et à toute la promotion des électroniciens 2014*

***Mohamed***

## ملخص

المحولات DC-DC تعمل على توفير جهد مستمر متغير من جهد مستمر ثابت. هناك عائلتان من هذه المحولات منها ماهي غير معزولة ومنها ماهي معزولة تحتوي على محول للعزل الغلفاني. كل أسرة تحتوي على عدة أنواع من المحولات. الغرض من هذه المذكرة هو دراسة ومحاكاة أنواع مختلفة من المحولات مستمر-مستمر وذلك بإعطاء مبدأ التشغيل والنموذج الرياضي لكل نوع

كلمات مفتاحية : محول DC-DC

### **Résumé :**

Les convertisseurs continu-continu ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Selon l'isolation, on distingue deux familles de convertisseurs continu-continu, non isolés et isolés comportant un transformateur pour assurer l'isolation galvanique. Chacune de ces familles est composée de plusieurs types de convertisseurs DC-DC.

L'objectif de mémoire est d'étudier et de simuler les différents types de convertisseurs DC-DC tout en décrivant le principe de fonctionnement de chaque convertisseur et en donnant son modèle mathématique.

Mots clés : convertisseurs DC-DC, isolation

### **Abstract:**

The DC-DC converters provide a variable DC output voltage from a fixed input voltage. On the basis of the galvanic isolation, two families of DC-DC converters can be distinguished : those which are non-isolated and those which are isolated having a transformer providing galvanic isolation. Each one of these families has many types of converters.

The aim of this work is to study and simulate the different types of DC-DC converters while describing their operating principles and giving their mathematical models.

Key words : DC-DC converters, isolation.

# Liste des figures

## CHAPITRE I

Figure I.1 Les différents hacheurs .....	4
Figure I.2 : Rapport cyclique de la commande du transistor .....	4
Figure I.3 : Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Buck.....	5
Figure I.4 : Circuits équivalents de Buck, S fermé en (a), S ouvert en (b).....	6
Figure I.5 : formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck.....	9
Figure I.7 : Rapport de conversion en fonction du rapport cyclique.....	10
Figure I.6 : Tension de sortie et ondulation du courant d'un convertisseur buck .....	10
Figure I.8 : circuit électrique d'un convertisseur Boost.....	11
Figure I.9 : Circuits équivalents de Boost, S fermé en (a), S ouvert en (b).....	11
Figure I.10 : Tension de sortie et ondulation du courant d'un convertisseur boost.....	14
Figure I.11 : Rapport de conversion en fonction du rapport cyclique .....	14
Figure I.12 : Schéma électrique du convertisseur Buck-Boost.....	15
Figure I.13: Circuits équivalents du buck-boost, S fermé (a), S ouvert (b).....	15
Figure I.14 : Tension de sortie et ondulation du courant d'un convertisseur buck-boost.....	17
Figure I.15 : Rapport de conversion en fonction du rapport cyclique .....	18
Figure I.16 : Topologie d'un convertisseur Cuk .....	18
Figure I.17 : Circuit équivalent du convertisseur Cuk, K fermé et ouvert .....	19
Figure I. 18 : Circuit électrique d'un convertisseur SEPIC .....	19

## **CHAPITRE II**

Figure II.1 : schéma de base d'un convertisseur Flyback.....	21
Figure II. 2 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Flyback.....	22
Figure II. 3 : schéma électrique d'un convertisseur forward .....	25
Figure II. 4 : schéma électrique d'un convertisseur Push-Pull.....	26
Figure II. 5: schéma électrique d'un convertisseur en demi-pont.....	27
Figure II.6 : schéma électrique d'un convertisseur en pont complet.....	28

# **SOMMAIRE**

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : Les convertisseurs DC-DC (non isolés) .....	3
I.1.Introduction.....	4
I.2. Etude des convertisseurs non isolés en mode de conduction continue.....	5
I.2.1. Hacheur serie « Buck ».....	5
I.2.1.1. Fonctionnement.....	6
I.2.1.2. Formes d'ondes.....	8
I.2.1.3. Modèle mathématique équivalent.....	9
I.2.1.4. Etude en régime continu.....	9
I.2.1.5. Rapport de conversion et rendement.....	10
I.2.1.6. Résultats de simulation.....	10
I.2.2. Hacheur parallèle « Boost ».....	11
I.2.2. 1. Formes d'ondes.....	12
I.2.2.2. Modèle mathématique équivalent.....	13
I.2.2.3. Rapport de conversion et rendement.....	14
I.2.2.4. Résultats de simulation.....	14
I.2.3. Hacheur Buck-boost.....	15
I.2.3.1. Formes d'ondes.....	15
I.2.3.2. Modélisation mathématique.....	16
I.2.3.3. Résultats de simulation.....	17
I.2.4. Convertisseur CUK.....	17
I.2.5. Le convertisseur SEPIC.....	18
I.2.5. 1.Fonctionnement.....	18
I.2.5.2. Formes d'ondes .....	19
Chapitre II : Les convertisseurs DC-DC (isolés) .....	20
II.1.Introduction.....	21
II.2.Etude des convertisseurs isolés.....	21
II.2.1. Convertisseur Flyback.....	21
II.2.1.1.Définition.....	22

II.2.1.2.Principe de fonctionnement.....	22
II.2.1.2.Etude de formes d'ondes.....	23
II.2.1.2.1. Etat passant.....	23
II.2.1.2.2. Etat bloqué.....	24
II.2.2. Convertisseur Forward.....	25
II.2.2.1.Formes d'ondes.....	25
II.2.3.Convertisseur Push-Pull.....	26
II.2.5. convertisseur en pont complet.....	27
II.2.4. Le convertisseur en demi-pont.....	28
Conclusion générale	
Bibliographie	



### INTRODUCTION GENERALE

Les systèmes nécessaires pour manipuler l'énergie électrique sont les convertisseurs statiques. Ils permettent d'adapter de manière réversible l'énergie entre le réseau et la charge.

Ces transformations apparaissent sous quatre formes pour lesquelles sont associés quatre types de convertisseurs : les redresseurs, les hacheurs, les onduleurs et les gradateurs ou les cyclo-convertisseurs. Les fonctions de base peuvent être utilisées seules ou associées entre-elles pour adapter les modes de conversion aux besoins de l'utilisateur.

La question fondamentale qui se pose est comment à partir d'une source de tension fixe, produire une source de tension inférieure ou supérieure et stable, éventuellement réglable avec un meilleur rendement énergétique possible. Plusieurs typologies ont été développées, entre autre rhéostat, diviseur de tension, jusqu'à ce que l'importance de l'efficacité énergétique soit avancée. Une technique qui consiste à découper la tension d'entrée puis la filtrer : c'est le principe des hacheurs[1].

Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu. Leur utilisation permet le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. [2].

Les convertisseurs non isolés peuvent être partagés en deux types en fonction de leur comportement et du sens de l'énergie qu'ils transfèrent, on distingue ainsi:

- Les hacheurs non réversibles qui permettent le transfert de l'énergie de la source vers la charge seulement.
- Les hacheurs réversibles où la source peut fonctionner en charge et inversement. Il est donc possible d'inverser le sens de parcours de l'énergie. On distingue trois types de hacheurs réversibles selon le type de conversion :
  - Les hacheurs réversibles en courant
  - Les hacheurs réversibles en tension
  - Les hacheurs réversibles en courant et en tension [3].

Parmi les convertisseurs à stockage d'énergie, on distingue :

- Les éleveurs (BOOST) dans lesquels  $V_o > V_i$ .
- Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels  $V_o < V_i$ .

Il y a aussi un type (BUCK-BOOST), mélange entre les deux précédents qui comporte plusieurs topologies comme le BUCK-BOOST classique, le FLYBACK, SEPIC, CUK, et le FORWARD ...

L'objectif de ce travail est d'étudier d'une façon comparative quelques modèles de convertisseurs DC-DC par simulation et modélisation mathématique.

La première partie est consacrée à l'étude des trois types des convertisseurs DC-DC non isolés qui sont les plus utilisés surtout dans les systèmes photovoltaïques.

- Les convertisseurs de type BUCK.
- Les convertisseurs de type BOOST.
- Les convertisseurs de type BUCK-BOOST qui peuvent fonctionner en BUCK ou en BOOST en fonction du rapport cyclique  $\alpha$ .

La deuxième partie est consacrée à l'étude de quelques types des convertisseurs DC-DC, comportant une isolation galvanique, tels que le Flyback et le Forward.

***Chapitre I***  
***Les convertisseurs DC-DC***  
***(non isolés)***

## I.1.Introduction :

Un hacheur est un convertisseur continu-continu qui doit permettre du transfert d'énergie entre une source continue et une charge. Cette charge peut être soit de nature capacitive (source de tension), soit de nature inductive (source de courant). Les convertisseurs non isolés peuvent être divisés en quatre types :

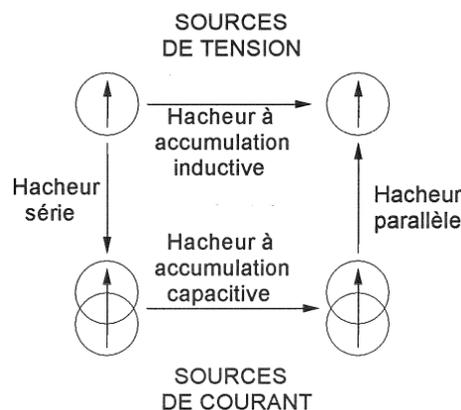
Les hacheurs qui associent deux sources de nature différentes :

- Le hacheur série, appelé aussi Buck ou dévolteur.
- Le hacheur parallèle, appelé aussi Boost ou survolteur.

Les hacheurs à accumulation :

- Le hacheur à stockage inductif appelé aussi Buck-Boost.
- Les hacheurs à stockage capacitif tel que le hacheur Cuk et le hacheur SEPIC

La figure ci-dessous présente le principe de transfert d'énergie des différents hacheurs non-isolés [6].



**Figure I.1 :** Le principe de transfert d'énergie des différents hacheurs non-isolés

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique" ("duty cycle"), défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant (figure I.2). L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout ou rien (bloqué-saturé). Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante avec un temps d'ouverture égale à  $T^*\alpha$ , et un temps de fermeture de  $T(1-\alpha)$ , où:

- $T$  la période de commutation qui est égale à  $1/f$ .
- le rapport cyclique du commutateur  $\alpha \in [0,1]$  Figure I.2.

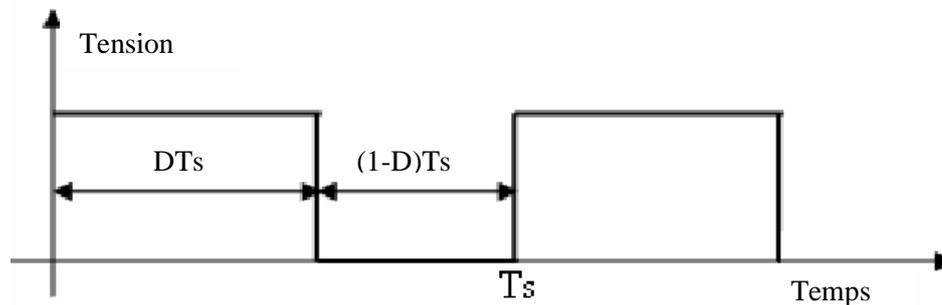


Figure I.2 : Rapport cyclique de la commande du transistor

## I.2. Etude des convertisseurs non isolés en mode de conduction continue :

### I.2.1. Hacheur serie « Buck » :

Le Schéma est donné ci-dessous. Il permet de relier une entrée de type « Tension » (qui n'a pas de discontinuité de tension) à une sortie de type « Courant » (qui n'a pas de discontinuité de courant).

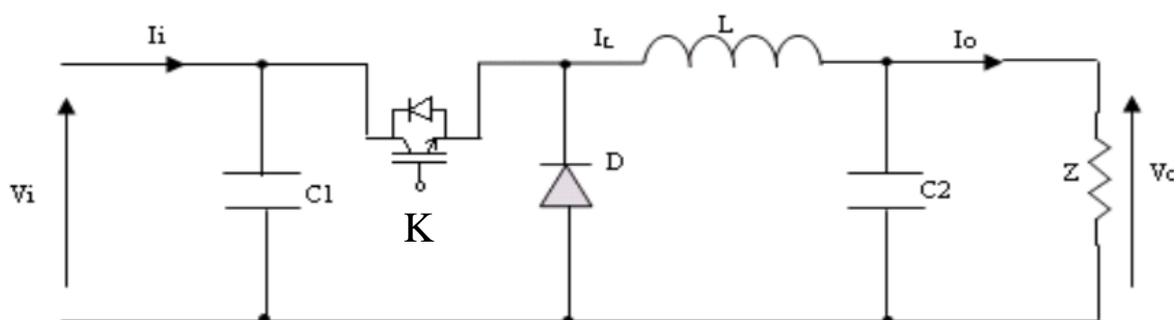


Figure I.3 :Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Buck.

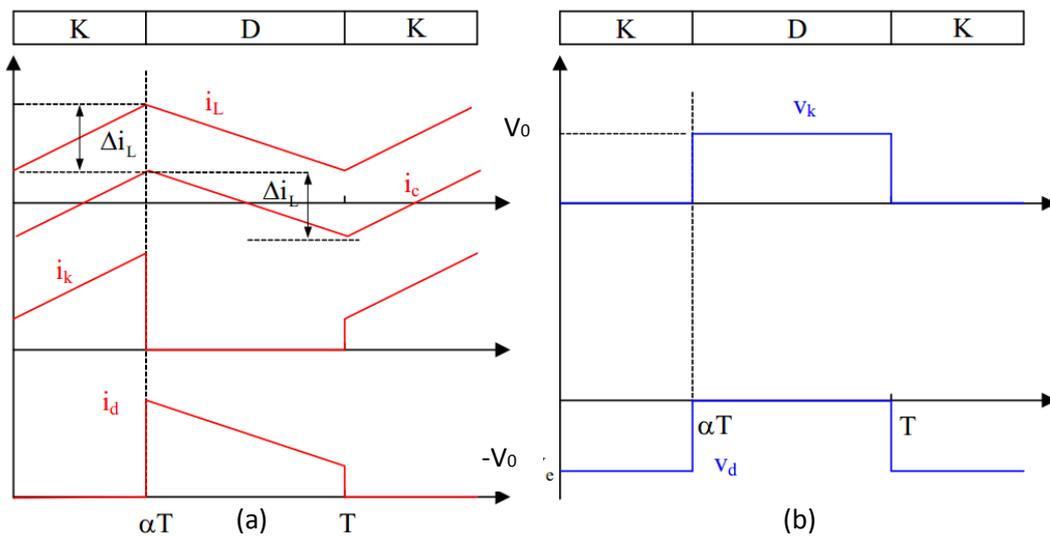
#### I.2.1.1. Fonctionnement :

Le transistor MOSFET travaille en régime de commutation avec une période  $T_s$ . Dans la première fraction  $\alpha T_s$  le transistor est dans un état de saturation, alors l'inductance  $L$  se charge d'énergie avec augmentation du courant  $I_L$ . Dans la deuxième fraction de temps  $(1-\alpha)T_s$  l'inductance  $L$  libère cette énergie à la charge  $Z$  avec une diminution de courant  $I_L$ . Alors le

circuit est décomposé en deux circuits linéaires qui correspondent à chaque état du transistor K [4].

**I.2.1.2. Formes d'ondes :**

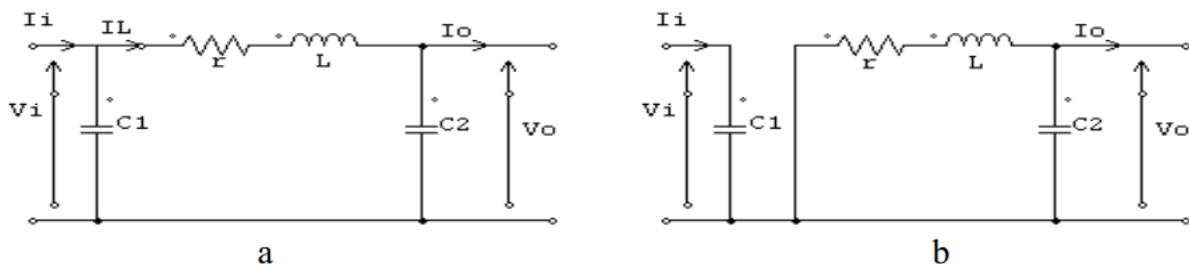
Lorsque ce convertisseur fonctionne en mode de conduction continue, on a les formes d'ondes de courant et de tension de la figure 1.4.



**Figure I.4 :** Formes d'ondes du convertisseur Buck ( a : courant , b : tension )

**I.2.1.3. Modèle mathématique équivalent :**

Pour extraire le modèle mathématique du convertisseur, il faut l'étudier dans les deux phases de fonctionnement (K fermé, et K ouvert), puis faire un modèle approximé qui englobe les différentes grandeurs moyennes d'entrée et de sortie du convertisseur. la figure ci-dessous représente les circuits équivalent du convertisseur Buck dans les deux cas.



**Figure I.5:** Circuits équivalents de Buck, K fermé en (a), K ouvert en (b).

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure I.4, on obtient les systèmes d'équations suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = i_L - i_o \quad 0 < t < \alpha T_S \text{ (I.1)} \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} + r i_L = v_i - v_o \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = i_L - i_o \quad \alpha T_S < t < (1-\alpha) T_S \text{ (I.2)} \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} + r i_L = -v_o \end{array} \right.$$

Pour trouver une représentation dynamique valable sur toute la période  $T_S$ , on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_S = \frac{dx}{dt}_{(\alpha T_S)} \alpha T_S + \frac{dx}{dt}_{(1-\alpha) T_S} (1-\alpha) T_S \quad \text{(I.3)}$$

Tel que le terme  $\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_S$  représente la valeur moyenne de la grandeur  $\frac{dx}{dt}$  sur la période  $T_S$ . En appliquant la relation I.3 sur les systèmes d'équations (I.1) et (I.2), et après arrangement, on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

Pour :  $0 < t < T_S$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_o = i_L - C_2 \frac{dv_o}{dt} \\ i_L = \frac{1}{\alpha} \left( i_L - C_1 \frac{dv_i}{dt} \right) \text{ (I.4)} \\ v_i = \frac{1}{\alpha} \left( v_o + r_L i_L + L \frac{di_L}{dt} \right) \end{array} \right.$$

Donc l'augmentation de courant  $i_L$  durant l'état passant  $\alpha T_S$  est donné par :

$$2\Delta I_L = \int_0^{\alpha T_s} \frac{V_L}{L} dt = \frac{V_i - V_o - r_L I_L}{L} \alpha T_s \quad (I.5)$$

l'inductance L à choisir pour certaine ondulation  $\Delta I_L$  est donnée par :

$$L = \frac{V_i - V_o - r_L I_L}{2\Delta I_L} \alpha T_s \quad (I.6)$$

Pour le calcul des capacités C1 et C2, et avec les mêmes démarches précédentes nous avons :

$$\frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{i_{C1}}{C_1} \approx \frac{I_i - I_L}{C_1} \quad (I.7)$$

$$\frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{i_{C2}}{C_2} \approx \frac{I_i - I_o}{C_2} \quad (I.8)$$

Les ondulations crête à crête des tensions d'entrée et de sortie sont :

$$\Delta V_i = \frac{I_i - I_L}{C_1} \cdot \alpha T_s \quad (I.9)$$

$$\Delta V_o = \frac{I_i - I_o}{C_2} \cdot \alpha T_s \quad (I.10)$$

Les condensateurs C1 et C2 sont données par :

$$C_1 = \frac{I_i - I_L}{2\Delta V_i} \cdot \alpha T_s \quad (I.11)$$

$$C_2 = \frac{I_i - I_o}{2\Delta V_o} \cdot \alpha T_s \quad (I.12)$$

#### I.2.1.4. Etude en régime continu :

Le régime continu est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes :

$$\left. \begin{array}{l} I_i = \alpha I_L \\ I_o = I_L \end{array} \right\} \quad (I.13)$$

$$V_i = \frac{1}{\alpha} (V_o + r_L I_L)$$

### I.2.1.5. Rapport de conversion et rendement :

Le rapport de conversion M est défini comme étant le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée comme :

$$M(\alpha) = \frac{V_o}{V_i} = \eta \alpha \quad (\text{I.14})$$

Où  $\eta$  est le rendement de convertisseur défini comme étant le rapport entre la puissance de sortie sur la puissance d'entrée :

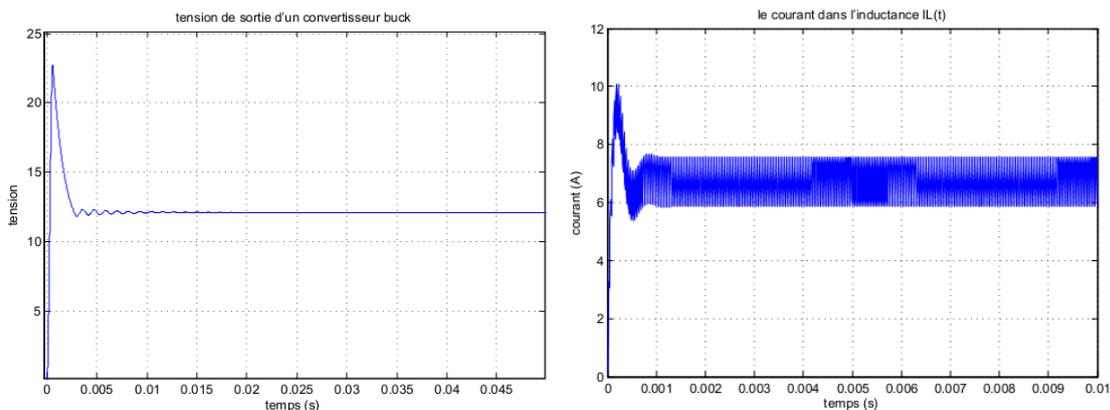
$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o I_o}{V_i I_i} \quad (\text{I.15})$$

Les relations II.14 et II.15 donnent :

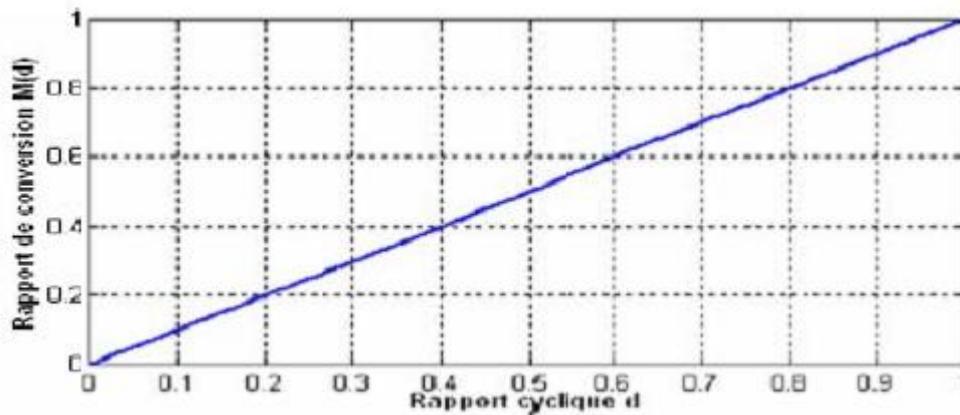
$$M(\alpha) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + \frac{r_L I_L}{V_o}} \alpha = \frac{1}{1 + \frac{r_L}{Z}} \alpha = \eta \alpha \quad (\text{I.16})$$

$$\text{Avec : } \eta = 1 / (1 + \frac{r_L}{Z}) \quad (\text{I.17})$$

**I.2.1.6. Résultats de simulation :** pour valider le comportement de ce type de convertisseur on a fait une simulation dans l'environnement Matlab/Simulink les résultats obtenus sont présentés sur les figures ci-dessous tel que la tension d'entrée est de 25 v, l'inductance  $L=10\text{mH}$ , condensateur de sortie  $C=220\mu\text{F}$  et un rapport cyclique de 50%.



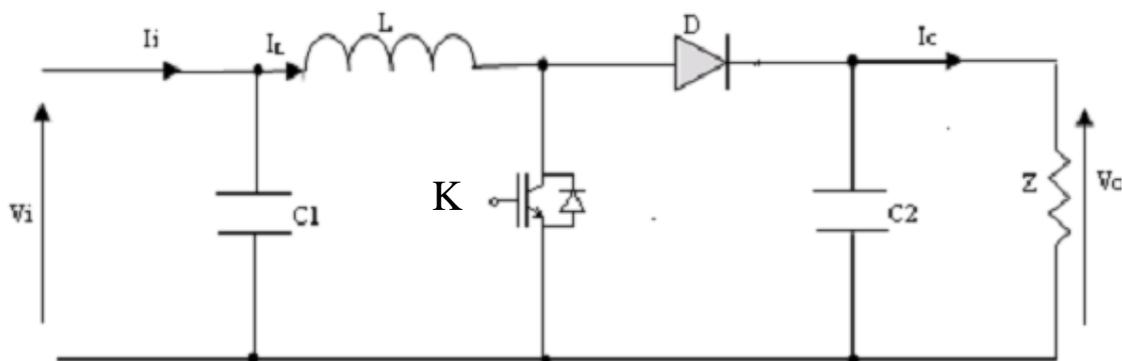
**Figure I.6 :** Tension de sortie et ondulation du courant du convertisseur buck



**Figure I.7 :** Rapport de conversion en fonction du rapport cyclique

### I.2.2. Hacheur parallèle « Boost » :

Le convertisseur Boost est connu aussi par le nom d'élevateur de tension, abaisseur de courant. Le Schéma ci-dessous représente le circuit électrique du Boost. Durant le temps  $\alpha T_s$ , le transistor K est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, au fur et à mesure elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin du premier intervalle. Le transistor K s'ouvre et l'inductance L délivre le courant  $I_L$  et ainsi génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge Z à travers la diode D.



**Figure I.8 :** circuit électrique d'un convertisseur Boost

#### I.2.2. 1. Formes d'ondes :

En mode de conduction continue, on a les formes d'ondes de courant et de tension de la figure 1-2.

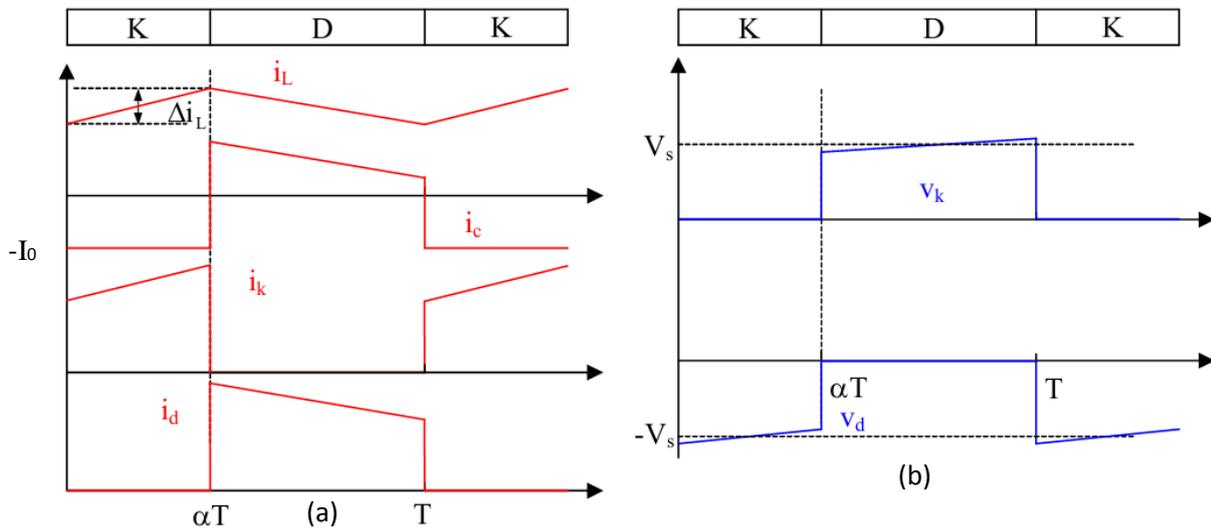


Figure 1.9 : Formes d'ondes du convertisseur Boost( a : courants, b : tension ) [7].

I.2.2.2. Modèle mathématique équivalent :

Comme pour le circuit Buck, l'application des lois de Kirchoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement nous donne :

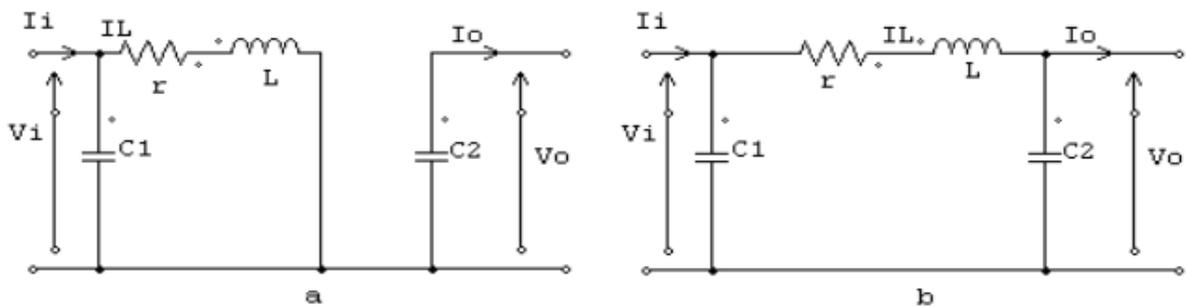


Figure I.10 : Circuits équivalents de Boost, K fermé en (a), K ouvert en (b).

Pour la premier période  $0 < t < \alpha.T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = -i_o \text{ (I.18)} \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - r_L i_L \end{cases}$$

Pour la deuxième période  $\alpha \cdot T_s < t < T_s$

$$\begin{cases} i_{c1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = i_L - i_o \text{ (I.19)} \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - v_o - r_L i_L \end{cases}$$

En appliquant la relation I.3 sur les systèmes d'équations I.19 et I.2, comme pour le buck, on trouve le modèle en valeur moyenné du boost :

$$\begin{cases} i_L = i_i - C_1 \frac{dv_i}{dt} \\ i_o = (1 - \alpha) i_L - C_2 \frac{dv_o}{dt} \text{ (I.20)} \\ v_i = (1 - \alpha) v_o + r_L i_L + L \frac{di_L}{dt} \end{cases}$$

### I.2.2.3. Rapport de conversion et rendement :

De même pour le Buck on peut calculer le rapport de conversion  $V_i/V_o$

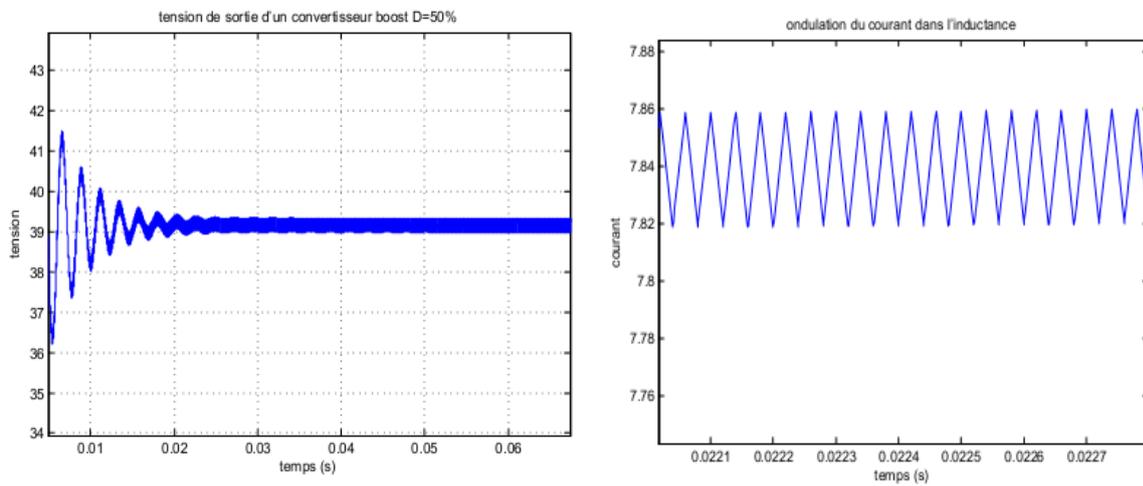
$$\begin{aligned} M(\alpha) = \frac{V_o}{V_i} &= \frac{1}{(1 - \alpha) + \frac{r_L I_L}{V_o}} = \frac{1}{1 + \frac{r_L I_L}{(1 - \alpha)^2 V_o}} \frac{1}{1 - \alpha} = \frac{1}{1 + \frac{r_L}{(1 - \alpha)^2 Z}} \frac{1}{1 - \alpha} \\ &= \eta \frac{1}{1 - \alpha} \text{ (I. 21)} \end{aligned}$$

$$\text{Où } \eta = \frac{1}{1 + \frac{r_L}{(1 - \alpha)^2 Z}}$$

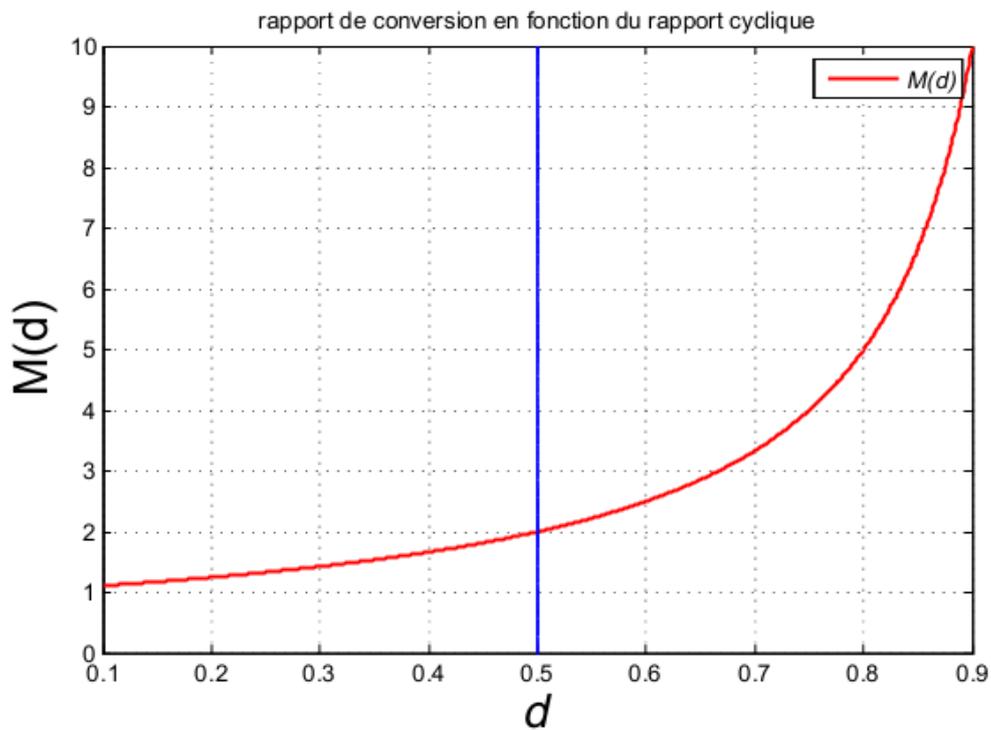
On remarque que le rendement  $\eta$  ne dépend pas seulement de la charge complexe  $Z$  du convertisseur et des résistances parasites des composants, mais il dépend aussi du rapport cyclique  $\alpha$ . Ainsi il est recommandé, pour que le Boost fournisse un bon rendement, de ne pas dépasser des rapports cycliques  $\alpha$  supérieurs à une certaine valeur, fixée par la qualité de l'inductance et la charge utilisée.

**I.2.2.4. Résultats de simulation :**

Pour une tension d'entrée  $V=20V$ ,  $L=10mH$ ,  $C=1000\ \mu f$  et le rapport cyclique  $D=50\%$ , les résultats obtenus sont représentés sur les figures ci-dessous



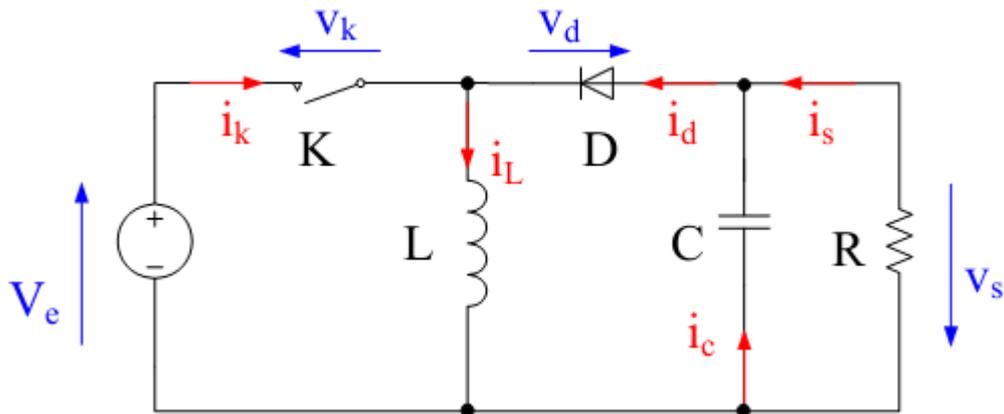
**Figure I.11 :** Tension de sortie et ondulation du courant d'un convertisseur boost



**Figure I.12 :** Rapport de conversion en fonction du rapport cyclique

**I.2.3. Hacheur Buck-boost:**

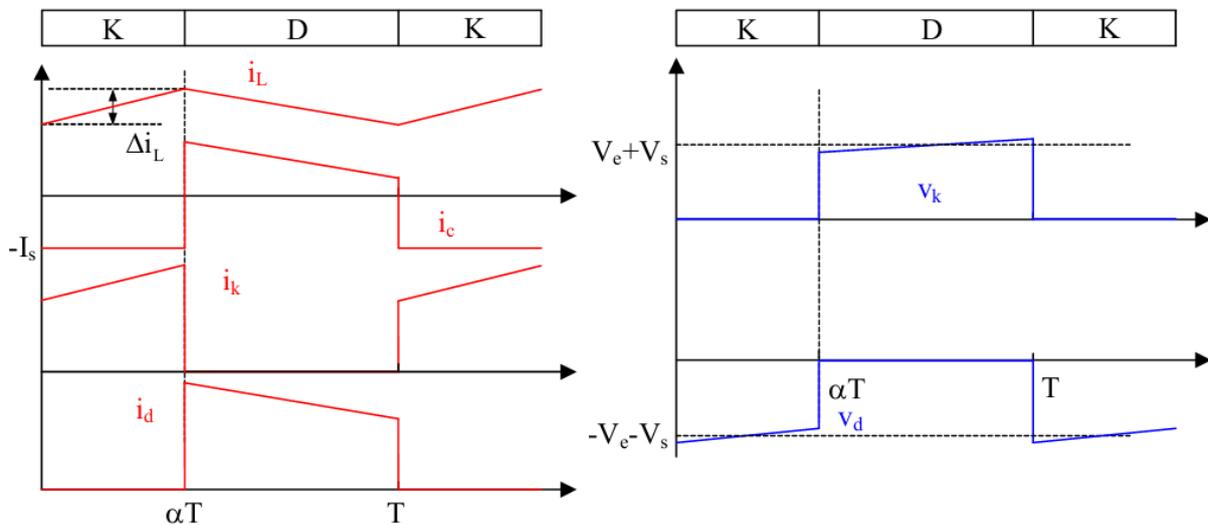
Ce dernier a acquis les caractéristiques et les propriétés électriques des deux types évoqués précédemment. Il présente donc une sorte d'un transformateur hybride (abaisseur/élevateur) pour une tension d'entrée/sortie continue ; son schéma de base est illustré par la figure I.13.



**Figure I.13 :** Schéma électrique du convertisseur Buck-Boost.

**I.2.3.1. Formes d'ondes :**

En conduction continue, les formes d'ondes de courant et de tension de ce convertisseur sont présentées dans la figure I.14



**Figure 1.14 :** Formes d'ondes du convertisseur Buck-Boost

### I.2.3.2. Modélisation mathématique :

La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élevateur-inverseur en tension.

Appliquant la même démarche que celle du convertisseur Buck on en déduit la tension de sortie moyenne  $V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_e$  (I.22)

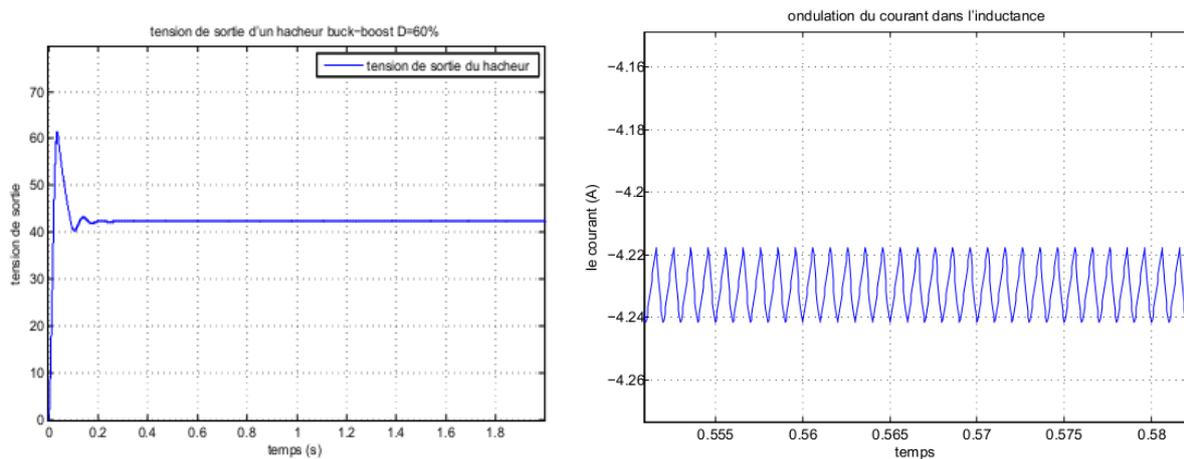
L'ondulation du courant dans l'inductance et la tension de sortie :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha V_e}{L_f} \quad (\text{I.23})$$

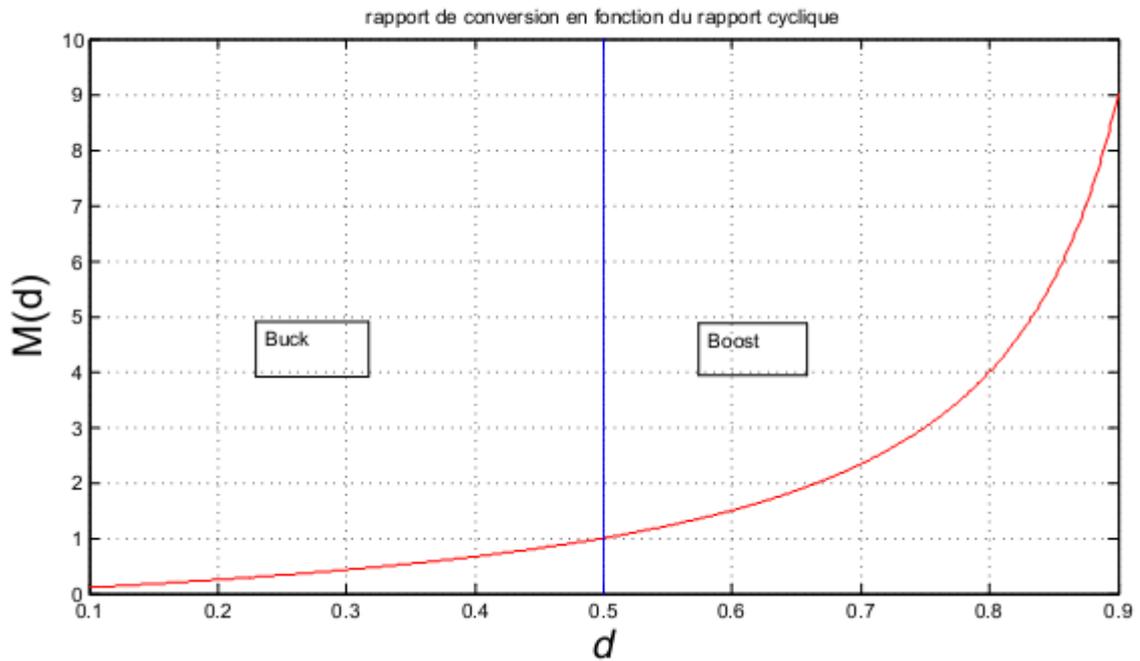
$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C_f} \quad (\text{I.24})$$

### I.2.3.3. Résultats de simulation :

Pour une tension d'entrée  $V=30\text{ V}$ ,  $L=10\text{ mH}$ ,  $C=1000\text{ }\mu\text{f}$  et le rapport cyclique  $D=50\%$ , les résultats obtenus sont représentés sur les figures ci-dessous



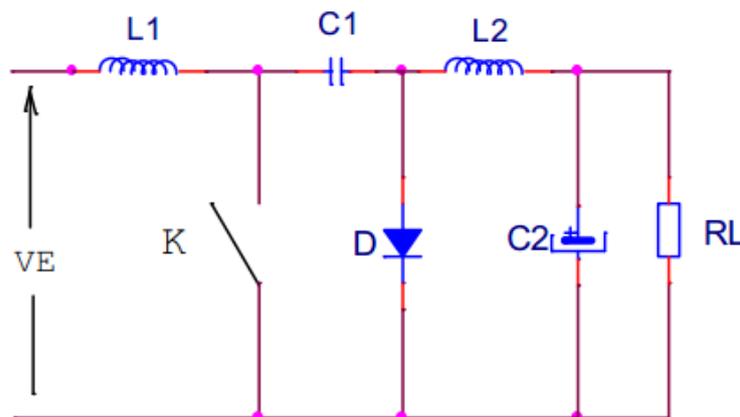
**Figure I.15 :** Tension de sortie et ondulation du courant d'un convertisseur buck-boost



**Figure I.16 :** Rapport de conversion en fonction du rapport cyclique

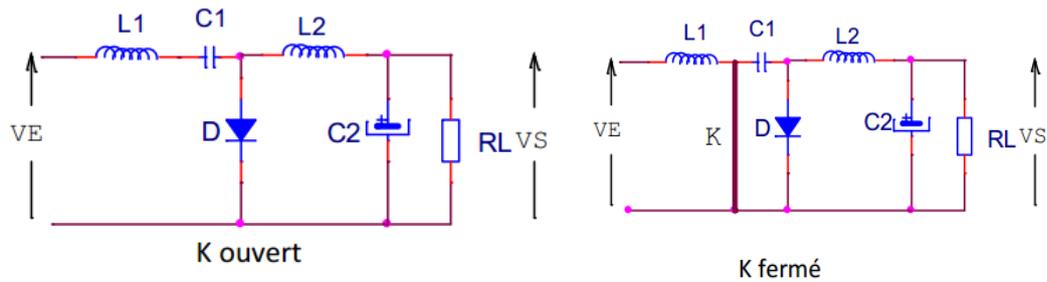
**I.2.4. Convertisseur CUK :**

Le Cuck est un convertisseur DC-DC qui utilise un condensateur pour stocker de l'énergie (et non une bobine) figure I.17 [5].



**Figure I.17 :** Topologie d'un convertisseur Cuk

Et suivant l'état d'interrupteur les deux configurations du convertisseur sont représentées à la figure ci-dessous :



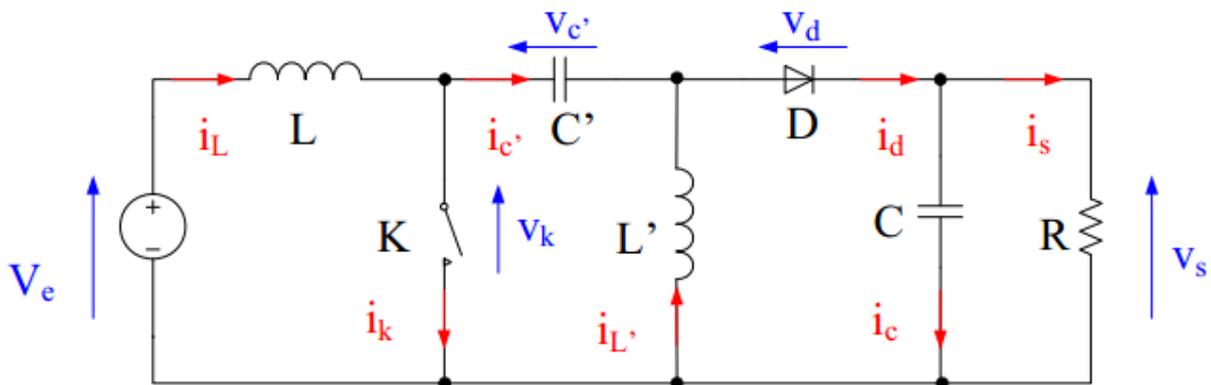
**Figure I.18 :** Circuit équivalent du convertisseur Cuk, K ouvert et fermé

Le condensateur C1 est utilisé pour transférer l'énergie entre la source et la sortie. Pour cela, il est connecté alternativement à l'entrée et à la sortie du convertisseur grâce à l'interrupteur et la diode.

Les inductances L1 et L2 sont utilisées respectivement pour les sources de tension d'entrée et de sortie en source de courant ces conversions sont nécessaires afin de limiter le courant lorsque l'on relie le condensateur C à une source de tension Vs ou Ve. La relation entre la tension d'entrée et la sortie est donnée par :  $\frac{V_s}{V_e} = -\frac{D}{1-D}$

**I.2.5. Le convertisseur SEPIC :**

SEPIC (de Single Ended Primary Inductor converter) est un convertisseur DC-DC qui permet de convertir une tension continue en une autre tension continue de valeur différente (plus faible ou plus grande). Le Sepic est semblable au Buck-Boost mais il a l'avantage d'avoir une sortie non inversée (la tension de sortie est de la même polarité que la tension d'entrée). Ce montage a été mis au point par Slobodan Cuk à la fin des années 1970. La figure ci-dessous Représente le montage de ce convertisseur.



**Figure I. 19 :** Circuit électrique d'un convertisseur SEPIC

**I.2.5. 1.Fonctionnement :**

L'étude se fait en deux parties selon l'état de conduction de l'interrupteur K.

**De 0 à  $\alpha T$  qui est la phase d'accumulation d'énergie :** On applique aux bornes de l'inductance L la tension d'entrée  $V_e$ , le courant traversant L va augmenter linéairement, l'énergie est stockée dans L. L'énergie contenue dans le condensateur C' passe dans l'inductance L', et celle du condensateur C vers la charge. La tension est maintenue constante par la le condensateur C.

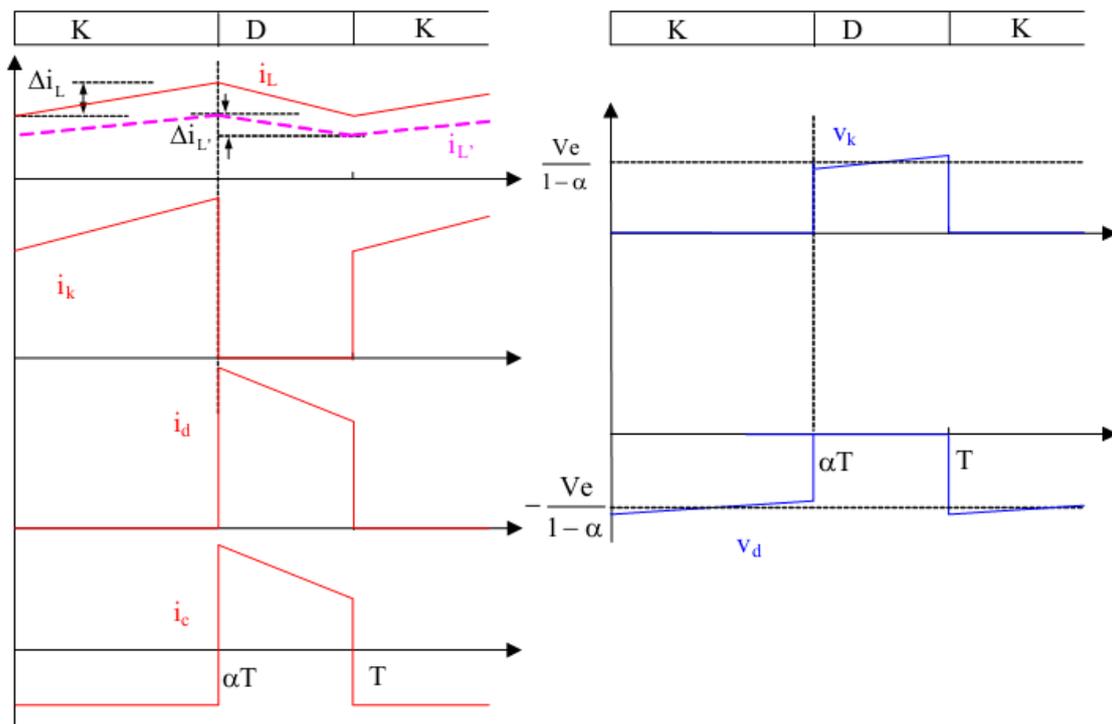
**De  $\alpha T$  à T Phase de roue libre :** On ouvre l'interrupteur K, ainsi la diode D se met à conduire. L'énergie emmagasinée dans l'inductance L est restituée dans le condensateur C'. L'énergie dans L sera est transférée vers C.

à partir des modèles mathématiques des deux phase on en déduit la relation :

$$\frac{V_S}{V_e} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

le convertisseur SEPIC n'est pas un inverseur de tension.

**I.2.5.2. Formes d'ondes :**



**Figure 1.20 :** Formes d'ondes du convertisseur Sepic

Les ondulations de courant et l'ondulation des tensions ayant pour valeurs :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (I.25)$$

$$\Delta I_{L'} = \frac{\alpha V_e}{L' f}$$

$$\Delta V_s = \frac{\alpha^2 V_e}{(1 - \alpha) \cdot R \cdot C \cdot f} \quad (I.26)$$

***Chapitre II***  
***Les convertisseurs DC-DC***  
***isolés***

### II.1.Introduction :

Les convertisseurs continu-continu isolés sont des convertisseurs continu-continu dans lesquels un transformateur assure une isolation entre la charge et la source d'alimentation.

Nous allons étudier dans cette partie, trois types de convertisseurs isolés :

Le FLYBACK (basé sur le hacheur à stockage inductif)

Le FORWARD (basé sur le hacheur série un quadrant)

Le PUSH PULL (basé sur le principe du hacheur en pont)

### II.2.Étude des convertisseurs isolés :

#### II.2.1. Convertisseur Flyback :

##### II.2.1.1.Définition :

Un convertisseur Flyback est une alimentation à découpage, généralement avec une isolation galvanique entre l'entrée et la sortie. Son schéma de base est le même que celui convertisseur Buck-Boost dans lequel on aurait remplacé l'inductance par un transformateur (en réalité deux inductances couplées). Le convertisseur Flyback est probablement la structure la plus utilisée en industrie électronique (moniteur LCD, télévision CRT, lecteur de DVD...). Il est généralement réservé aux applications de puissance réduite

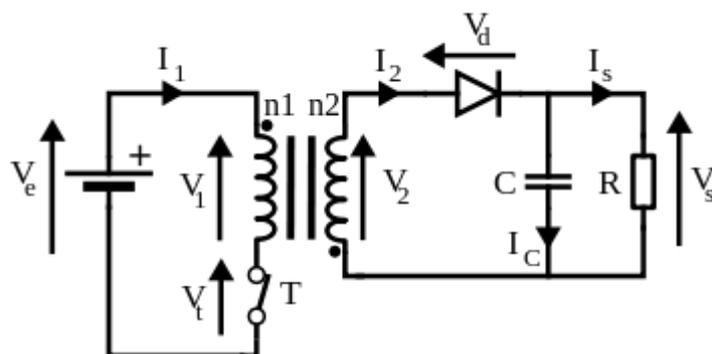


Figure II.1 : Schéma de base d'un convertisseur Flyback

##### II.2.1.2.Principe de fonctionnement :

Le schéma de base d'un convertisseur Flyback est représenté sur la figure 1. C'est l'équivalent d'un convertisseur Buck-Boost dans lequel on aurait remplacé l'inductance par deux inductances couplées jouant le rôle de transformateur. Par conséquent le principe de fonctionnement des deux convertisseurs est très proche. Dans les deux cas on distingue une phase de stockage d'énergie dans le circuit magnétique et une phase de restitution de cette énergie.

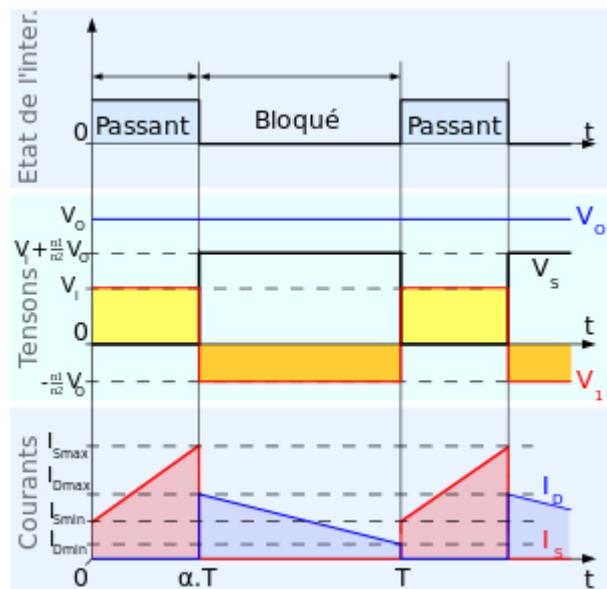
Le dimensionnement du circuit magnétique définit la quantité d'énergie que l'on peut stocker mais aussi la rapidité avec laquelle on peut en réaliser le stockage et le déstockage. C'est un paramètre important qui détermine la puissance que peut fournir l'alimentation Flyback.

Le fonctionnement d'un convertisseur Flyback peut être divisé en deux étapes suivant l'état de l'interrupteur  $T$  Figure II.1

- Dans l'état passant, l'interrupteur  $T$  est fermé, le primaire du transformateur est relié directement à la source de tension d'entrée. Il en résulte une augmentation du flux magnétique dans le transformateur. La tension aux bornes du secondaire est négative, bloquant ainsi la diode. C'est le condensateur de sortie qui fournit l'énergie demandée par la charge.
- Dans l'état bloqué, l'interrupteur est ouvert. L'énergie stockée dans le transformateur est transférée à la charge.

### II.2.1.2. Etude de formes d'ondes :

Quand un convertisseur Flyback travaille en mode de conduction continue, le flux dans le transformateur ne s'annule jamais. La figure II.2 montre les formes d'ondes du courant et de la tension dans le convertisseur.



**Figure II. 2 :**Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Flyback.

#### II.2.1.2.1. Etat passant :

Durant l'état passant, l'interrupteur  $T$  est fermé, entraînant l'augmentation du courant suivant la relation :

$$V_e = V_1 = L_1 \frac{dI_1}{dt} \quad (\text{II.1})$$

$$I_{1_{max}} = I_{1_{min}} + \frac{V_e \cdot \alpha \cdot T}{L_1}$$

Avec  $I_{1_{min}}$  la valeur du courant à  $t=0$ .  $I_{1_{min}}$  correspond aussi à la valeur minimale du courant  $I_1$ . Sa valeur exacte sera déterminée par la suite. À la fin de l'état passant,  $I_1$  a atteint sa valeur maximale  $I_{1_{max}}$ .

À la fin de l'état passant, l'énergie  $W_e$  stockée dans le transformateur vaut

$$W_e = \frac{1}{2} L_1 I_{1_{max}}^2 \quad (\text{II.2})$$

La conservation de l'énergie stockée dans le transformateur provoque l'apparition d'un courant  $I_2$  dans le secondaire du transformateur, dont la valeur initiale  $I_{2_{max}}$  peut être calculée grâce à la conservation de l'énergie stockée dans le transformateur lors de son « passage » du primaire vers le secondaire

$$W_e = \frac{1}{2} L_1 I_{1_{max}}^2 = \frac{1}{2} L_2 I_{2_{max}}^2 \quad (\text{II.2})$$

En remplaçant  $L_1$  et  $L_2$  par leur expression en fonction de la réluctance  $R$  du circuit magnétique et du nombre de spires des enroulements du transformateur, on obtient

$$I_{2_{max}} = \frac{n_1}{n_2} I_{1_{max}} \quad (\text{II.3})$$

Le calcul de la tension  $V_2$  peut se faire grâce aux relations flux/tension. Le sens relatif des bobinages étant inversé :

$$V_2 = -\frac{n_2}{n_1} V_1 \quad (\text{II.4})$$

#### II.2.1.2.2. Etat bloqué :

Durant l'état bloqué, l'énergie emmagasinée dans le circuit magnétique lors de l'état passant est transférée au condensateur.

$$V_s = V_2 = -L_2 \frac{dI_2}{dt} \quad (\text{II.5})$$

$$I_2 = I_{2_{max}} - \frac{V_s}{L_2}(t - \alpha T) \quad (\text{II.6})$$

À la fin de l'état bloqué,  $I_2$  a atteint sa valeur minimale  $I_{2_{min}}$

$$I_{2_{min}} = I_{2_{max}} - \frac{V_s}{L_2}(T - \alpha T) \quad (\text{II.7})$$

Le calcul de la tension  $V_1$  peut se faire grâce aux relations flux/tension. Le sens relatif des bobinages étant inversé, on a :

$$V_1 = n_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{II.8})$$

$$V_s = V_2 = -n_2 \frac{d\varphi}{dt}$$

Donc

$$V_1 = -\frac{n_1}{n_2} V_s \quad (\text{II.9})$$

Si on considère que le convertisseur a atteint son régime permanent, la tension moyenne aux bornes des enroulements du transformateur est nulle. Si on considère en particulier la tension moyenne  $V_2$  aux bornes de l'enroulement secondaire :

$$\bar{V}_2 = \frac{1}{T} \left( -\frac{n_2}{n_1} V_e \alpha T + V_s (T - \alpha T) \right) = 0 \quad (\text{II.10})$$

D'où

$$V_s = \frac{n_2}{n_1} \frac{\alpha}{1 - \alpha} V_e \quad (\text{II.11})$$

On obtient la même relation que pour le convertisseur Buck-Boost au rapport de transformation  $n_2/n_1$  près. Cela est dû au schéma de base d'un convertisseur Flyback qui est le même que celui d'un convertisseur Buck-Boost dans lequel on aurait remplacé l'inductance par un transformateur de rapport  $n_2/n_1$ . La tension de sortie ne dépend pas du courant de sortie, mais uniquement du rapport cyclique et de la tension d'entrée.

### II.2.2. Convertisseur Forward :

Dans ce convertisseur, l'énergie est directement transférée de la source vers la charge pendant la phase de conduction de l'interrupteur K. Le circuit se comporte comme un convertisseur abaisseur qui fonctionnerait à la même fréquence, avec le même rapport cyclique, mais sous une tension d'entrée qui serait multipliée par le rapport de transformation du transformateur.

Cependant il faut noter quelques particularités dues à la présence du transformateur.

L'énergie emmagasinée dans l'inductance primaire du transformateur pendant la phase de conduction de l'interrupteur K doit être aiguillée vers un circuit capable de l'accueillir, sinon elle donnera lieu à une forte surtension au moment de l'ouverture de l'interrupteur qui risque de le détruire.

Une méthode qui consiste à récupérer cette énergie, à l'aide d'un enroulement supplémentaire sur le transformateur, et de la restituer à la source.

Le rapport de transformation primaire / enroulement de démagnétisation est souvent pris égal à l'unité. La tension vue par l'interrupteur K lors de la phase de démagnétisation est alors de deux fois la tension d'entrée.

Le fonctionnement correct du circuit suppose que le transformateur soit complètement démagnétisé à chaque cycle, ce qui impose une limitation du rapport cyclique. Dans le cas d'un rapport de transformation primaire / enroulement de démagnétisation de 1, le rapport cyclique doit être limité à 50%.

La figure ci-dessous présente le schéma électrique d'un convertisseur Forward .

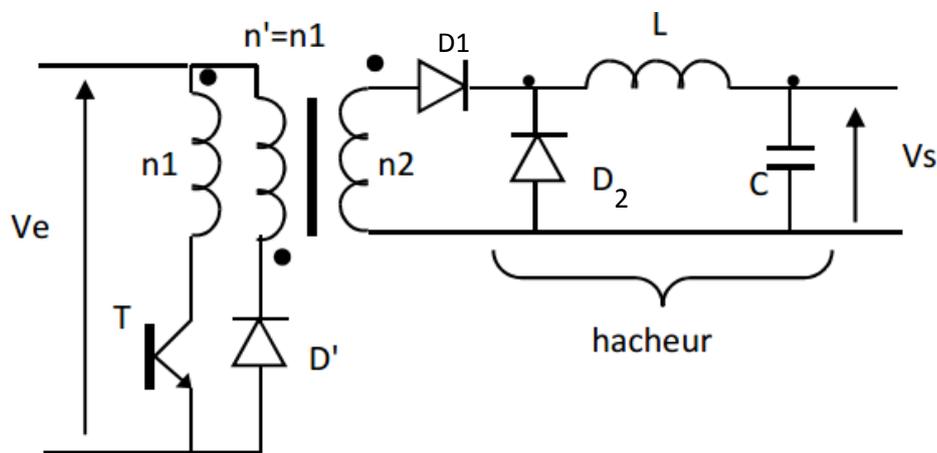


Figure II. 3 :Schéma électrique d'un convertisseur Forward.

#### II.2.2.1. Formes d'ondes :

A  $t=0$ , on ferme T :  $V_{d1} > 0$  et  $V_{d2} < 0$ , donc D1 est fermée et D2 est bloquée.  $0 < t < \alpha T$

$$V_L = \frac{n_2}{n_1} V_e - V_s \quad (\text{II.12})$$

$V_L$  est positive donc  $I_L$  augmente linéairement

à  $t = \alpha T$ , on ouvre  $T_1$  :  $I_L$  circule à travers  $D_2$  et  $V_L = -V_o$  (pour  $\alpha T < t < T$ ) qui est négative, donc  $I_L$  diminue linéairement. La valeur moyenne de  $V_L$  sur une période est égale à zéro :

$$V_{Lmoy} = 0 = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{\alpha T} \left( \frac{n_2}{n_1} V_e - V_s \right) dt + \int_{\alpha T}^T -V_o dt \right] \quad (\text{II.13})$$

$$\frac{1}{T} \left( \frac{n_2}{n_1} V_e - V_s \right) \alpha - \frac{1}{T} V_o (T - \alpha T) \quad (\text{II.14})$$

Donc :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{n_2}{n_1} \alpha \quad (\text{II.15})$$

La tension est proportionnelle à  $\alpha$ . Ce qui est, au rapport de transformation près, la même expression que pour le Buck vu précédemment.

### II.2.3. Convertisseur Push-Pull : Figure II.4

Le circuit est arrangé pour produire une tension alternative à l'entrée du transformateur. Sur la première moitié de la période (durant laquelle  $T_1$  fonctionne jusqu'à  $T_{on}$ ). Quand  $T_1$  est en conduction :  $D_1$  conduit et  $D_2$  est bloquée, d'où :

$$V_L = \frac{n_2}{n_1} V_e - V_s \text{ Pour } 0 < t < T_{on} \text{ et } I_L \text{ à travers } D_1 \text{ augmente linéairement}$$

Durant le reste de la première demi période, les 2 transistors sont bloqués, donc  $V_L = -V_s$  et  $I_{d1} = I_{d2} = I_L / 2$

Le fonctionnement se répète pour le transistor  $T_2$  sur l'autre moitié de la période. La valeur moyenne de la tension  $V_L$  sur demi période = 0, d'où

$$\frac{V_s}{V_e} = 2 \frac{n_2}{n_1} \alpha \quad 0 < \alpha < 0.5 \quad (\text{II.16})$$

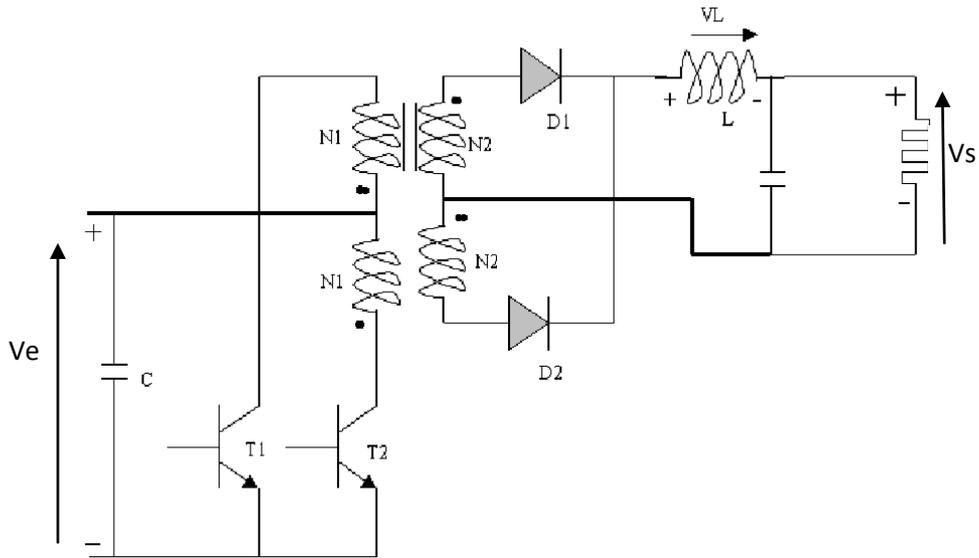


Figure II. 4 :Schéma électrique d'un convertisseurPush-Pull

II.2.4.Convertisseur en demi-pont(figure II.5) :

Les condensateurs C1 et C2 donnent une source de tension à point milieu et les transistors T1 et T2 sont saturés en alternance : l'un sur  $T_{on}$  la moitié d'une période et l'autre sur  $T_{on}$  dans l'autre moitié de la même période.

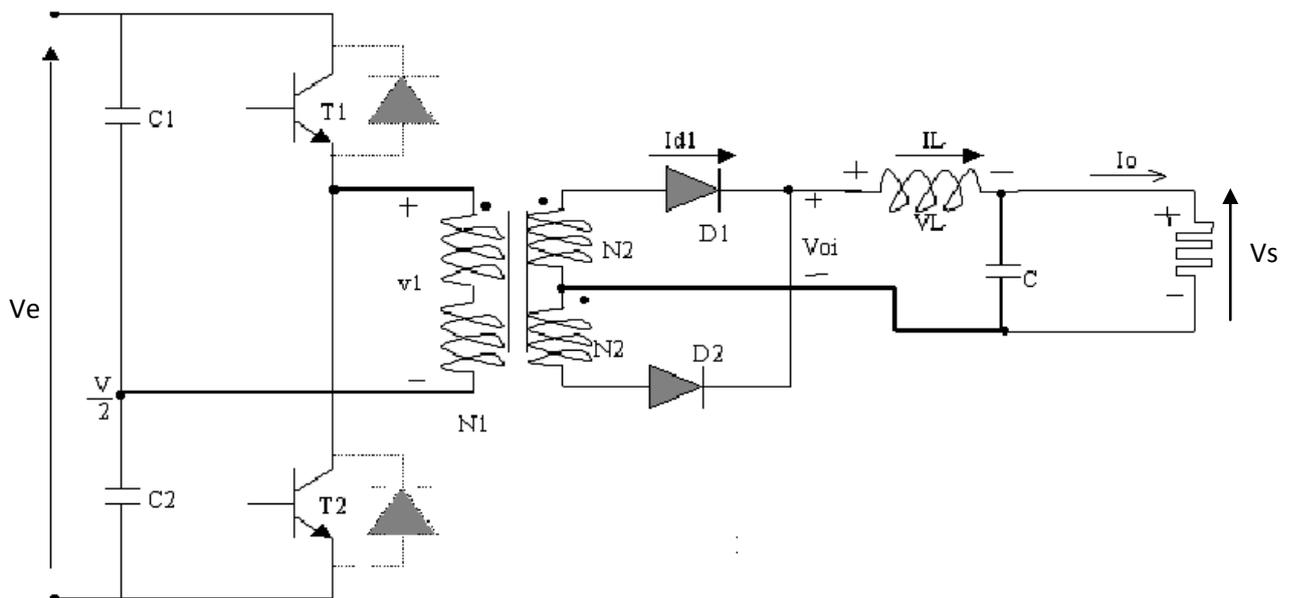


Figure II. 5:Schéma électrique d'un convertisseur en demi-pont

On obtient  $\frac{V_s}{V_e} = 2 \frac{n_2}{n_1} \alpha$   $0 < \alpha < 0.5$

II.2.5. Convertisseur en pont complet (figure II.6) :

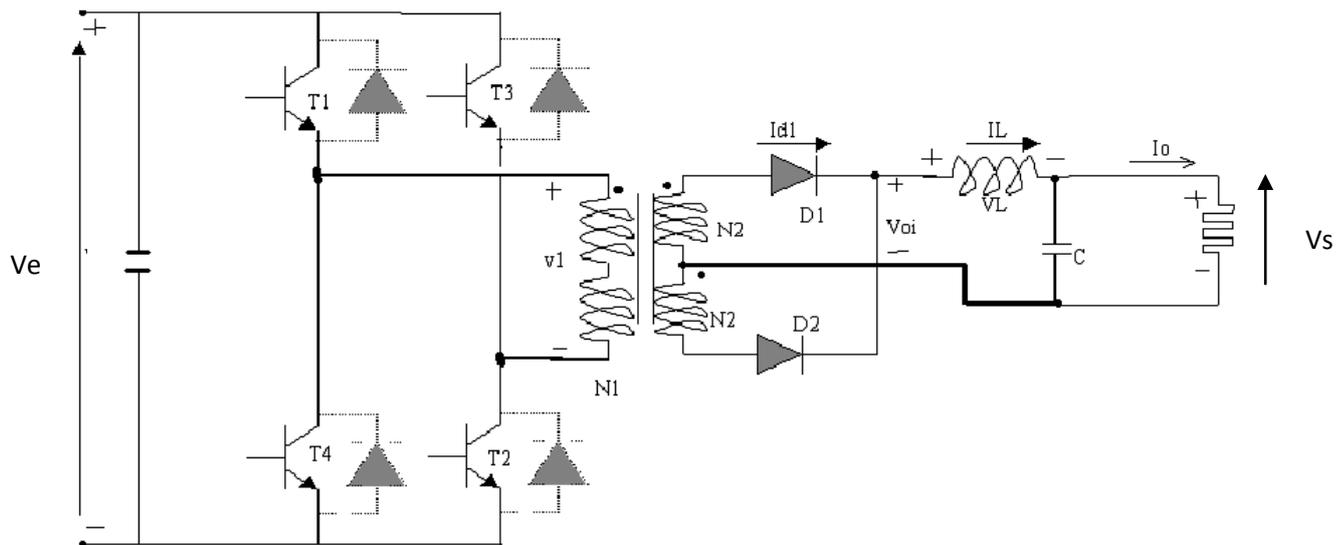


Figure II.6 : Schéma électrique d'un convertisseur en pont complet

Nous avons ici le principe de fonctionnement avec le convertisseur demi-pont mais avec les transistors ( $T_1, T_2$ ) et ( $T_2, T_4$ ) amorcés alternativement par paire.

## CONCLUSION GENERALE

Le travail que nous avons effectué a comme objectif une étude comparative entre les différents modèles des convertisseurs DC-DC. Nous avons procédé à une étude globale et une extraction des modèles mathématiques des principaux types des convertisseurs DC-DC ainsi que leurs fonctionnements.

L'utilisation de l'environnement SIMULINK de Matlab nous a permis de faire une simulation des différents types de convertisseurs et comprendre ainsi leurs fonctionnements.

L'ensemble des convertisseurs DC/DC que nous venons de présenter constitue une famille complète de convertisseurs, dans le sens où, selon la topologie mise en œuvre, l'on est capable :

- D'abaisser des niveaux de tension ou de courant continu.
- D'élever des niveaux de tension ou de courant continu.
- D'élever ou d'abaisser le choix des niveaux de tension ou de courant continu, selon la valeur du rapport cyclique choisi.
- D'assurer une réversibilité en courant

les convertisseurs DC-DC sont très utilisés surtout dans le domaine photovoltaïque ils jouent le rôle d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge à travers une action de contrôle pour la poursuite du point de puissance maximale.

- [1] A.BISKER “ commande d’un système hybride en mode isolé et connecté au réseau “ PFE ENP 2012.
- [2] S. KASAT “Analysis, design and modeling of dc-dc converter using simulink” Institute of Engineering and Technology Indore, Madhya Pradesh State India Master of Science December, 2004
- [3] A.RUFER “Cours d'Electronique de puissance Conversion DC/DC “Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne
- [4] K.SOBAIHI “Etude et réalisation d’un hacheur de tracking de point de puissance maximale (MPPT) à contre réaction de tension“ mémoire de magistère ENP Alger 2003.
- [5] M.HADDADI “ Les Alimentation stabilisées” cours 2013, ENP Alger
- [6] B. HUANG “convertisseur continu-continu à rapport de transformation élevé pour applications pile à combustible” Thèse de Doctorat Institut Nation Polytechnique de Lorraine mai 2009
- [7] A.JAMMAL “ les convertisseurs DC-DC (les hacheurs ) ” cours