

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**UNIVERSITEE AMAR TELIDJI DE LAGHOUCAT**



**FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES**

**DEPARTEMENT ELECTROTECHNIQUE**

**Spécialité : Automatique et Systèmes**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

*En vue de l'obtention du*

**DIPLOME DE MASTER**

*Thème :*

---

**Commande par logique floue d'un hacheur Buck à  
base d'un Mosfet**

---

**Réalisé par : Menne Toutou Mohamed Elhabib**

**Encadré par : M.Belkheiri Ahmed**

## *Remerciements*

*Je tiens à remercier dieu le tout clément et miséricordieux, qu'i m'a offert la vie, la sante, et la force pour attribuer ce travail.*

*Je voudrais aussi dans un premier temps, remercier mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi depuis que je suis née jusqu'à aujourd'hui. Je remercie mes chers parents d'être le parfait exemple d'effort et de sacrifices*

*J'exprime également ma gratitude à mon cher oncle, Ahmed vall Ayah qui m'a apporté son soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche. Je lui dis un grand MERCI*

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, Monsieur BELKHEIRI Ahmed. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé et sur tout pour le temps qu'il a consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche.*

*Je remercie sincèrement ma chère NAOUI Fatima d'être ma deuxième mère, je la remercie et sa famille, ainsi que ma tante et mon enseignante MAYDI Hniya, de me faire sentir entourée par une famille, de croire en moi, de me valoriser, merci pour tout, tout simplement.*

*Je tiens à remercier spécialement mes professeurs : Bachiri Mohamed, Zeghoudi Abdelfattah, Bendelala Fathi, Biram Mhamed, Bendjedia Bachir, Bougrine Djamaledine, Mokrani Lakhdar, Guibadj Mssadek, Benalia Atallah, pour leur enseignement de qualité qui a représenté une profonde satisfaction intellectuelle*

*Je remercie ma très chère amie et sœur, Souade pour son encouragement, son soutien et sur tout pour son sens d'amitié*

*Il me serait difficile de citer tous ceux qui m'ont aidé et encouragé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail, je vous envoie l'expression de ma reconnaissance, Merci.*



# Sommaire

Introduction generale .....	10
<b>Chapitre I</b>	
I.1) Introduction .....	11
I.2) généralité sur les sources.....	11
I.2.1) Définition .....	11
I.2.2) Types de sources .....	11
I.3) types des convertisseurs .....	12
I.4) généralité sur les hacheurs.....	12
I.4.1) Structure des hacheurs .....	13
I.4.2) types des hacheurs .....	14
I.4.3) hacheur Buck .....	
I.4.4) domaines d'utilisation des hacheurs .....	15
I.5) Généralité sur le PWM .....	15
I.6) Généralité sur la logique floue .....	16
I.6.1) bref historique sur la logique floue .....	16
I.6.2) les champs d'application .....	17
I.6.3) la commande par logique floue .....	17
I.6.4) Structure générale d'un contrôleur flou .....	18
I.6.5) le fonctionnement d'un système flou .....	19
I.6.6) définition d'une règle inférence .....	20
<b>Chapitre II</b>	
II.1) Généralité sur le dimensionnement .....	22

II.2) Description et principe de fonctionnement .....	22
II.2.1) Description .....	22
II.2.2) Principe de fonctionnement .....	22
II.3) Modélisation et dimensionnement de l'hacheur Buck .....	25
<b>Chapitre III</b>	
III.1) introduction .....	31
III.2) modèle du convertisseur DC/DC sur Simulink .....	31
III.3) modèle du convertisseur avec correcteur PI (Boucle fermée) .....	35
III.4) modèle du convertisseur avec correcteur flou (Fuzzy logic) .....	38
	44
Conclusion générale .....	
Références .....	45

## Liste des figures :

<b>Figure I.1 :</b> schéma de principes des convertisseurs .....	
<b>Figure I.2 :</b> principe d'un hacheur .....	
<b>Figure I.3:</b> l'emplacement de la diode de roue libre .....	
<b>Figure I.4 :</b> principe d'un hacheur Buck .....	
<b>Figure I.5 :</b> Allure d'un signal PWM .....	
<b>Figure I.6 :</b> un Contrôleur flou en boucle fermée .....	
<b>Figure I.7:</b> structure d'un contrôleur flou .....	
<b>Figure I.8 :</b> principe ce fonctionnement d'un contrôleur flou .....	
<b>Figure II.1 :</b> schéma des deux états d'un hacheur série .....	
<b>Figure II.2 :</b> ondes de la tension d'après le du fonctionnement du l'interrupteur	
<b>Figure II.3 :</b> principe du rapport cyclique .....	
<b>Figure II.4 :</b> schéma des ondes de tension de sortie de l'hacheur dévolteur .....	
<b>Figure II.5 :</b> modèle électrique de l'hacheur .....	
<b>Figure II.6 :</b> l'allure du courant inductif .....	
<b>Figure III.1 :</b> modèle de l'hacheur Buck sur Simulink .....	
<b>Figure III.2:</b> résultat de la 1ère simulation .....	
<b>Figure III.3 :</b> résultat de la deuxième simulation .....	
<b>Figure III.4 :</b> résultat de la troisième simulation .....	
<b>Figure III.5 :</b> modèle de l'hacheur Buck en boucle fermée sur Simulink .....	
<b>Figure III.6 :</b> résultat de la 1ère simulation en boucle fermée .....	
<b>Figure III.7 :</b> résultat de la deuxième simulation en boucle fermée .....	
<b>Figure III.8 :</b> hacheur Buck commandé par un contrôleur flou en boucle fermée sur Simulink .....	

**Figure III.9** : designer du contrôleur flou .....

**Figure III.10** : les fonction d'appartenance des entrées du contrôleur .....

**Figure III.11** : les règles d'inférence du contrôleur flou .....

**Figure III.12** : Résultat de la 1<sup>ère</sup> simulation avec contrôleur flou .....

**Figure III.13** : Résultat de la deuxième simulation avec contrôleur flou .....

**Figure III.14** : résultat de la troisième simulation avec contrôleur flou .....

**Figure III.15** : schéma de comparaison entre le correcteur PI et le contrôleur flou

## *Liste des tableaux :*

**Tableau I.1** : propriétés relatives des interrupteurs commandable .....

**Tableau II.1:** synthèse des équations décrivant un Buck .....

---

# **Introduction générale**

---

Grace au progrès sur les composants électriques et sur leur mise en œuvre, l'électronique de puissance, que l'on devrait d'ailleurs nommer " électronique de conversion d'énergie " a pris une importance considérable dans tout le domaine de l'électricité industrielle. Elle s'occupe des dispositifs qui permettent le transfert de l'énergie électrique entre un générateur et un récepteur souvent de nature différente. Ces dispositifs sont « les convertisseurs », ils constituent des équipements de distribution d'énergie électrique, dans lesquels ils assurent une fonction particulière de réglage progressif d'une ou de plusieurs grandeurs de sortie (courant, tension, fréquence...).

Dans l'étude de l'électronique de puissance, on peut distinguer trois aspects :

- L'étude des composants : elle explique le fonctionnement des semi-conducteurs, leurs caractéristiques, les limitations à respecter dans leur emploi.
- L'étude des structures : elle est consacrée aux relations que les convertisseurs établissent entre leur grandeurs d'entrée et de sortie.
- L'étude de la commande : elle indique comment élaborer les signaux de commande de semi-conducteurs à partir de la transformation réalisée et de la dynamique souhaitée pour l'ensemble dans lequel intervient le convertisseur.

Dans ce travail, nous prenons comme objectif, la commande d'un convertisseur à courant continu-continu abaisseur de tension « hacheur Buck » à base d'un Mosfet par la commande en boucle fermée.

Ce travail sera constitué par trois chapitres :

- I. Etat de l'art des hacheurs et de la logique floue.
- II. Modélisation du convertisseur DC-DC.
- III. Simulation et réalisation de l'hacheur.

---

# Chapitre I : état de l'art des hacheurs, du PWM et de la logique floue

---

## I.1) Introduction

Avec l'apparition des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance, avec les diodes, les transistors, et les thyristors, les systèmes de conversion deviennent de plus en plus élaborés et ne nécessitent plus de machines tournantes. C'est l'ère des convertisseurs statiques.

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs à composants électroniques (semi-conducteurs) capables de modifier la source d'énergie électrique pour s'adapter au récepteur à haut rendement en assurant les fonctionnalités suivantes :

- La transformation : génération d'une tension continue à partir d'une source alternative et vice versa
- La régulation : l'alimentation constante d'une charge à partir d'une source variable
- L'adaptation : l'alimentation d'une charge à basse tension à partir d'une source haute tension et vice versa

## I.2) généralité sur les sources

### I.2.1) Définition

On appelle source tout élément capable d'imposer une tension ou un courant, quel que soit, respectivement, le courant qui le traverse, ou la tension qu'on lui applique.

### I.2.2) Types de sources :

On distingue alors deux sortes de sources dans l'électricité :

- Une source de tension : qui impose une tension quel que soit le courant qui la traverse, cette source peut se trouver sous forme :
  - Continue : caractérisée par la valeur  $U$  de la tension.
  - Alternative : définie par la valeur de la tension efficace  $V$  et de la fréquence  $f$ .
- Une source de courant : qui impose un courant quelle que soit la tension à ses bornes, elle peut se présenter aussi sous forme :
  - Continu : dont la valeur et le sens de circulation restent constants
  - Alternatif : dont la valeur, ainsi que la polarité ou le sens de circulation fluctuent périodiquement.

### I.3) types des convertisseurs

Comme il est évident que selon la nature de tension ou de l'intensité du courant de source et du récepteur (continu ou alternatif), se différencient les convertisseurs entre eux. On distingue alors quatre types de convertisseurs :

- Convertisseur alternatif - alternatif : c'est un gradateur
- Convertisseur alternatif - continu : c'est un redresseur
- Convertisseur continu - alternatif : c'est un onduleur.
- Convertisseur continu - continu : c'est un hacheur

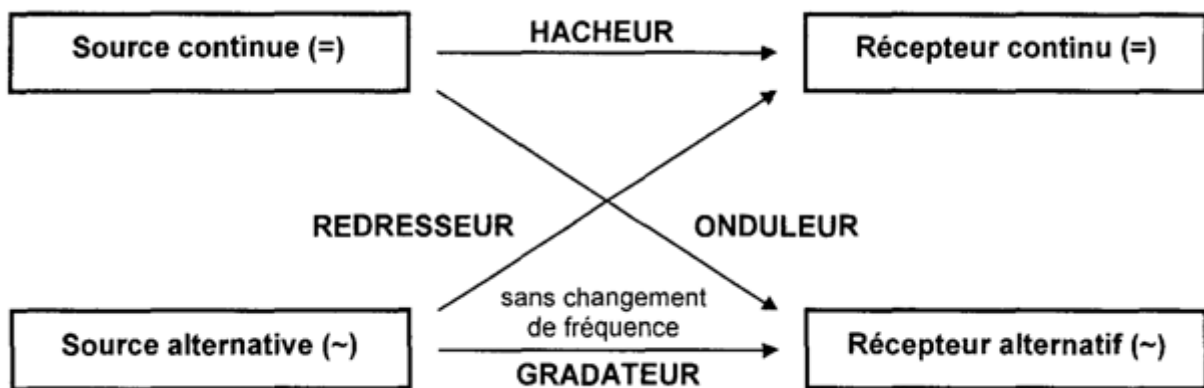


Figure (I.1) : schéma de principes des convertisseurs

### I.4) généralité sur les hacheurs

Le convertisseur continu-continu ou hacheur est un convertisseur statique permettant la variation d'une tension continue pour l'adapter à la care ou pour varier la vitesse d'un moteur à courant continu (qui est le cas pour ce travail) et ce avec un rendement élevé Il joue le même rôle que le gradateur en courant alternatif.

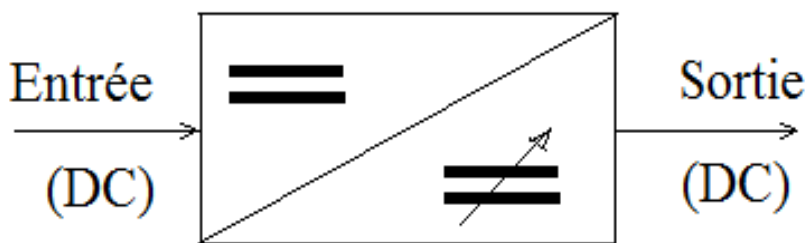


Figure (I.2) : principe d'un hacheur

Il existe plusieurs types des hacheurs comme sera situer tout de suite

### I.4.1) Structure des hacheurs

Les différentes structures des hacheurs dépendent du cahier de charges imposé au système. En fait un hacheur est généralement constitué par les éléments suivants :

- ✓ Un générateur : qui assure une source de tension qui est constante quel peu importe le courant débité
- ✓ Un interrupteur commandable : qui peut être représenté par un semi-conducteur à borne de commande genre un MOSEFT, un Thyristor SCR ou un transistor bipolaire (BJT, IGBT...)

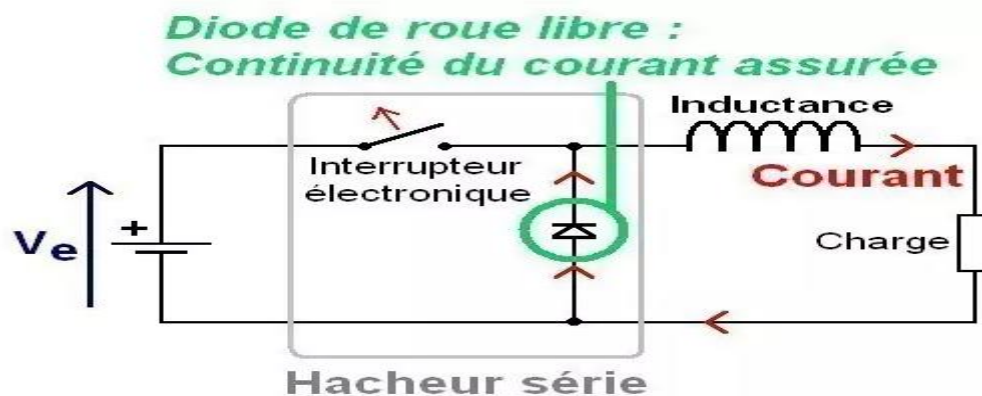
Ces semi-conducteurs se différencient selon la vitesse de commutation et au niveau de la puissance à manipuler comme suite :

Semiconducteur	Niveaux de puissance pouvant manipuler	Vitesse de commutation « fréquences »
BJT	Moyen	Moyen
MOSFET	Faible	Rapide
GTO	Fort	Lent
IGBT	Moyen	Moyen
MCT	Moyen	Moyen

**Tableau (I.1)** : propriétés relatives des interrupteurs commandable

- ✓ Un condensateur : qui sert à lisse la tension tout en servant de réserve d'énergie.
- ✓ Une bobine : qui sert à lisser le courant pour permettre au condensateur d'avoir une tension plus régulière. Sans inductance, le condensateur se chargerait brutalement à la fermeture de l'interrupteur et sa tension attendrait la tension d'entrée.

- ✓ Une diode de roue libre : La diode sert à la continuité du courant dans l'inductance. Sans cette diode, une surtension apparaîtrait et détruirait l'interrupteur



**Figure (I.3)** : l'emplacement de la diode de roue libre

## I.4.2) types des hacheurs

Généralement les hacheurs se différencient par la valeur de la tension délivrée à la sortie par rapport à la tension source. Pour cela on cite les trois catégories des hacheurs suivants :

- Si la tension délivrée à la sortie est inférieure à la tension source, l'hacheur est dit dévolteur (Buck)
- Si la tension délivrée à la sortie est supérieure à la tension source, l'hacheur est dit survolteur (Boost)
- Si l'hacheur est capable de travailler des deux manières, il est dit (Boost-Buck)

Quant à la différence des hacheurs au niveau de réversibilité, il existe deux types d'hacheur :

- ❖ Hacheurs réversibles permettent d'inverser le courant ou la tension ou les deux simultanément, cela veut dire qu'il fonctionne en tant d'un moteur et d'une génératrice.
- ❖ Hacheurs irréversibles qui assure un transfert unidirectionnel de l'énergie électrique (uniquement de la source vers la charge). Parmi cde types des hacheurs, l'hacheur Buck.

## I.4.3) hacheur Buck

L'hacheur Buck est un hacheur non réversible qui a le montage série, permet de transformer une tension continue fixe en une tension d'alimentation plus faible réglable par l'utilisateur. Il est constitué d'un transistor interrupteur, d'une diode, d'une inductance, d'un condensateur et d'une résistance. Son principe est donné par le schéma suivant :

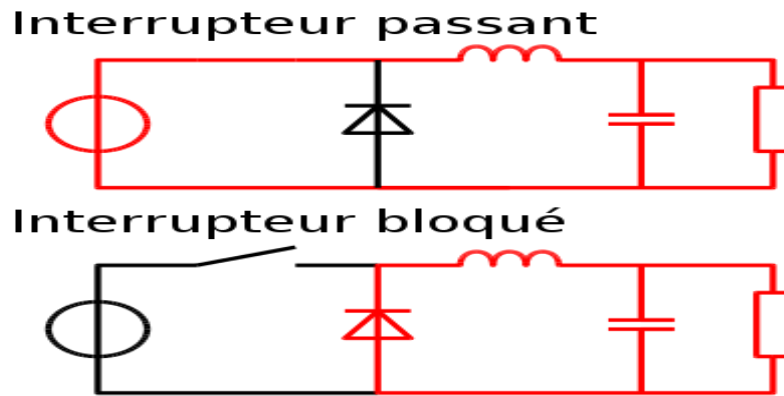


Figure (I.4) : principe d'un hacheur Buck

#### I.4.4) domaines d'utilisation des hacheurs

Les applications des hacheurs sont nombreuses à notre époque, ils sont principalement utilisés pour :

- La variation de vitesse des moteurs à courant continu
- Pour les fortes puissances, ils interviennent comme un organe de réglage de puissance électriques.
- Dans les alimentations à découpage à courant continu.
- Pour l'alimentation des moteurs pas à pas.
- Pour régler le degré de luminosité d'une lampe par exemple

### I.5) Généralité sur le PWM

Un signal PWM (pulse width modulation) est un signal de modulation de largeur d'impulsion, avec une fréquence constante et un rapport cyclique variable ( $\sigma = t_{on}/T$ ). Il est utilisé souvent Pour la commande en vitesse d'un moteur à Courant continu qui fait naturellement office d'un filtre passe bas.

Le signal du PWM (ou MLI) est un signal rectangulaire généré souvent par un transistor MOSFET, dont la valeur moyenne ne dépend que du rapport cyclique et de la tension d'entrée. La moyenne du ce signal est une courbe sinusoïdale qui peut être récupérée par l'intermédiaire d'un filtre passe bas en retirant la fréquence porteuse  $f=1/T$ . d'où la relation de la tension moyenne suivante :  $U_s = \sigma U_e$

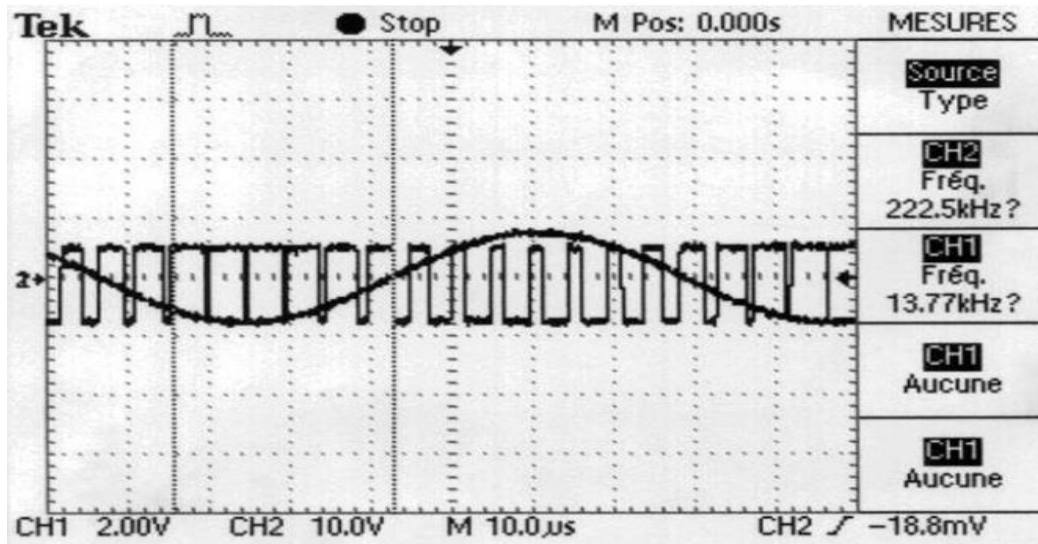


Figure (I.5) : Allure d'un signal PWM

## I.6) Généralité sur la logique floue

La logique floue, est une extension de la logique booléenne créée par le savant Lotfi zadeh en 1965, en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, permettant ainsi à une condition d'être dans un état autre que vrai ou faux.

La logique floue, confère une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des incertitudes et des imprécisions.

Un des intérêts de la logique floue pour formaliser le raisonnement humain, est que les règles sont énoncées en langage naturel.

### I.6.1) bref historique sur la logique floue

**1965** : concept introduit par Pr. Lotfi Zadeh :

{Fuzzy set theory} : définition des ensembles flous et operateurs associées

**1970** : première application :

Système expert, aide à la décision en médecine, commerce...

**1974** : première application industrielle :

Régulation floue d'une chaudière à vapeur réalisée par Pr. Ebrahim Mamdani.

## **I.6.2) les champs d'application**

Les systèmes FLC trouvent une large gamme d'application dans divers produits et systèmes industriels, commerciaux et médicaux. Dans plusieurs applications liées à des systèmes non linéaires, variables dans le temps et mal définis.

Les applications des systèmes FLC comprennent :

- ✓ Dans le domaine médical (aide à la décision) ;
- ✓ Contrôle robotique ;
- ✓ Contrôle adaptatif ;
- ✓ Contrôleur de la vitesse automobile ;
- ✓ Contrôle des réacteurs nucléaires ;
- ✓ Contrôle des missiles ;
- ✓ Commande d'ascenseur ;
- ✓ Unité de contrôle de détection de défaut ;
- ✓ L'orientation professionnelle (aide à la diagnostic) ;
- ✓ Base de données ;
- ✓ Reconnaissance de forme ;
- ✓ Commande floue des systèmes ;

## **I.6.3) la commande par logique floue**

Le contrôle par logique floue (FLC), est le domaine de recherche le plus actif dans l'application de la théorie des ensembles flous, du raisonnement flou et de la logique floue. L'application de la FLC s'étend du contrôle des processus industriels à l'instrumentation et aux sécurités biomédicales.

La commande en logique floue permet de s'affranchir de l'utilisation de modèles mathématiques parfois difficiles à obtenir. Par rapport aux techniques de contrôle conventionnelles, le FLC a été mieux utilisées dans des problèmes complexes mal définis.

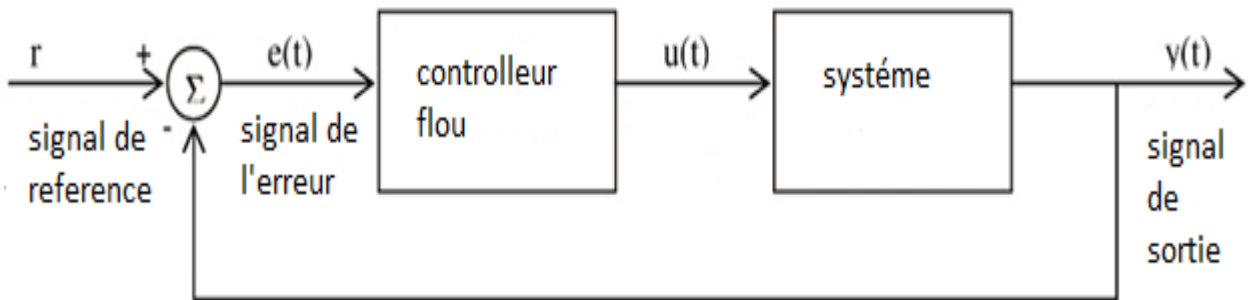
Le contrôle est assuré par un système de contrôle, qui est un ensemble de composants physiques conçus pour modifier un autre système physique afin que ce système présente certaines caractéristiques désirables.

Il existe deux types de systèmes de contrôle :

- ❖ Les systèmes de contrôle en boucle ouverte : où l'action de contrôle d'entrée est indépendante de la sortie physique du système
- ❖ Les systèmes de contrôle en boucle fermée : l'action de contrôle d'entrée dépend de la sortie physique du système

Pour les systèmes de contrôle à boucle fermée (contrôle à rétroaction), la sortie physique sous contrôle est ajustée à l'aide d'un signal d'erreur. Cette erreur est tout simplement la différence entre la réponse réelle du système (calculée) et la consigne (la réponse souhaitée).

Un modèle d'un contrôleur flou en boucle fermée est donnée par la figure suivante :



**Figure (I.6) :** un Contrôleur flou en boucle fermée

#### **I.6.4) Structure générale d'un contrôleur flou**

Un contrôleur flou est généralement composée de trois parties :

- La fuzzification des entrées et sorties : qui a le rôle de transformer les valeurs d'entrées en variable linguistique ou quantité floue (l'étape de la quantification floue)
- L'inférence floue selon une base de règle : applique les règles aux entrées fuzzifiées afin de prendre la décision floue.
- La déffuzzification des sorties : transforme les décisions floues en valeurs de sorties numériques déterminées

Une structure d'un contrôleur flou est donnée par la figure suivant :

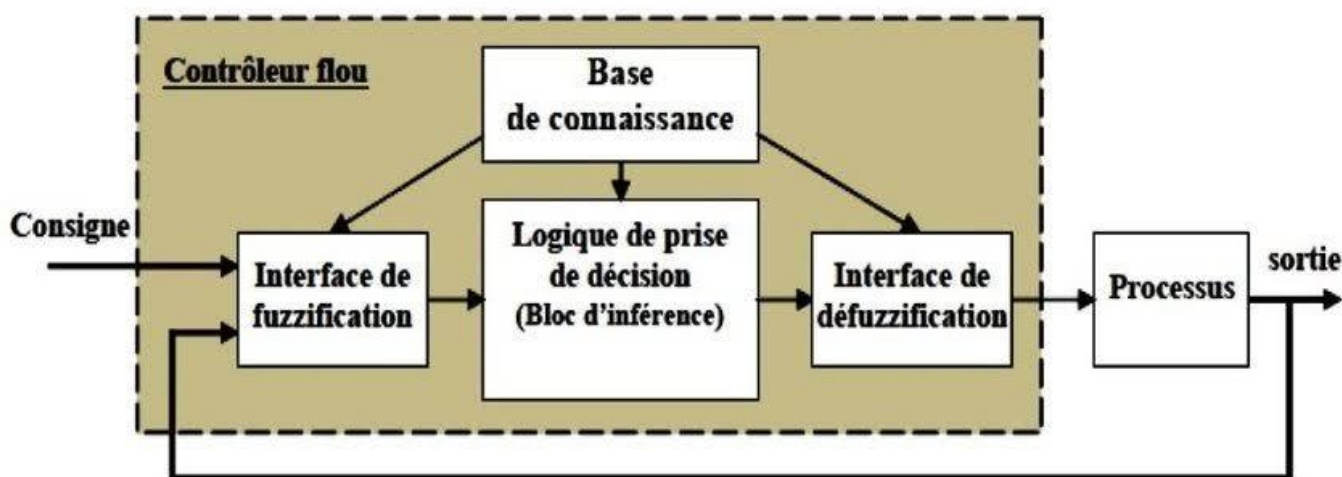


Figure (I.7) structure d'un contrôleur flou

### I.6.5) le fonctionnement d'un système flou :

Le principe de fonctionnement d'un système flou c'est de pouvoir calculer des paramètres de sorties en fournissant au système un ensemble des règles formules en langage naturel.

Grace a une fonction d'appartenance créée par le concepteur du système flou, le système va pouvoir transformer une donnée mesurée en une variable linguistique (la Fuzzification), ensuite et après l'application des règles d'inférence par le moteur d'inférence, chaque règle génère une commande de sortie, d'où l'obtention de plusieurs commandes générées par le moteur d'inférence (l'inférence floue), ces commandes seront fusionnées pour donner qu'une seule commande de sortie linguistique. Cette commande de sortie sera aussi transformée en donnée numérique (la Déffuzzification)

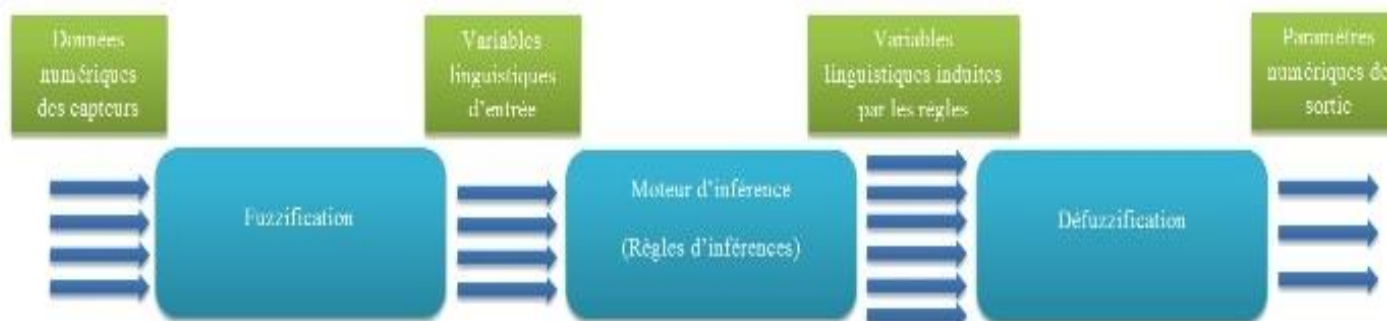


Figure (I.8) : principe ce fonctionnement d'un contrôleur flou

### **I.6.6) définition d'une règle inférence**

Une règle d'inférence est une fonction qui prend un ensemble des formules (prémisses) et rend une formule (conclusion). Les règles d'inférence sont aussi des relations par lesquelles une conclusion est dite déductible ou dérivable des prémisses.

---

## Chapitre II : Modélisation du convertisseur DC-DC.

---

## II.1) Généralité

Comme il est déjà mentionné, le convertisseur DC-DC est un dispositif électromécanique permettant l'obtention d'une tension réglable par l'utilisateur, et dans le cas qui est le nôtre (Buck), une tension plus inférieure à celle de la source. C'est un type des convertisseurs de puissance électrique. Il est constitué d'un transistor interrupteur, d'une diode, d'une inductance, d'un condensateur et d'une charge.

## II.2) Description et principe de fonctionnement

### II.2.1) Description

L'hacheur série est composé par un interrupteur et une diode qui travaillent en alternance de façon à former un commutateur bi-positionnel, et par des éléments passifs (L, C)

- Le premier interrupteur est un transistor commandable à l'amorçage et au blocage, il est en série avec la source de tension  $V_e$ . Il peut être représenté par l'un des semi-conducteurs connus.
- La diode dite de roue libre qui s'amorce et se bloque spontanément. Cette Diode sert à assurer la continuité du courant de l'inductance L
- La bobine et le condensateur sont placés en un ordre formant un filtre passe bas pour le courant et la tension

L'intérêt de l'hacheur série (qui est un transistor ou un thyristor) est de pouvoir allumer et éteindre des milliers de fois par seconde, contrairement à un interrupteur qu'on ne peut manœuvrer qu'au rythme de sa main...

### II.2.2) Principe de fonctionnement

L'hacheur série ou (dévolteur) fonctionne selon un principe de commutation à fréquence élevée, il assure la transformation d'énergie d'une source vers une charge en utilisant le principe de charge et de décharge des éléments accumulateurs (L et C) à la même cadence ON et OFF de l'interrupteur.

L'interrupteur commandé K, s'ouvre et se ferme dans une période de commutation T.

En fonction de la valeur minimale du courant inductif, on distingue deux modes de conduction dans l'élément L à accumulation :

- ✓ Mode de Conduction Continue « CCM »
- ✓ Mode de Conduction Discontinue « DCM ».

Notre cas où le courant de l'induction ne s'annule jamais. **Le convertisseur fonctionne en mode de conduction continue**

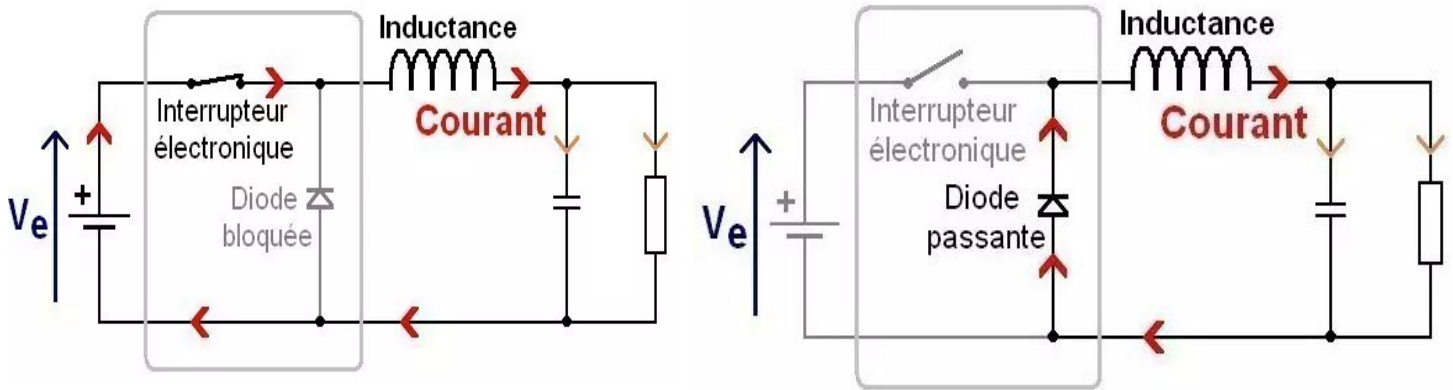


Figure (II.1) : schéma des deux états d'un hacheur série

➤ Pendant la fermeture  $T_{on}=\alpha T$ , la diode D sera polarisée en inverse et elle se bloque spontanément et la bobine se recharge par un courant d'un niveau minimal vers un autre maximal. Au bout de cette durée de fermeture  $T_{on}$ , l'interrupteur s'ouvre à la demande d'une commande extérieure appliquée sous forme d'un rapport cyclique entre la durée  $T_{on}$  et la période de commutation  $T$ .

➤ Au cours de cette ouverture  $T_{off}$ , la charge inductive acquise sera transmise au condensateur de sortie C et à l'élément de charge (Résistance R par exemple) à travers une maille de roue libre via la diode qui est polarisée en directe et devient passante.

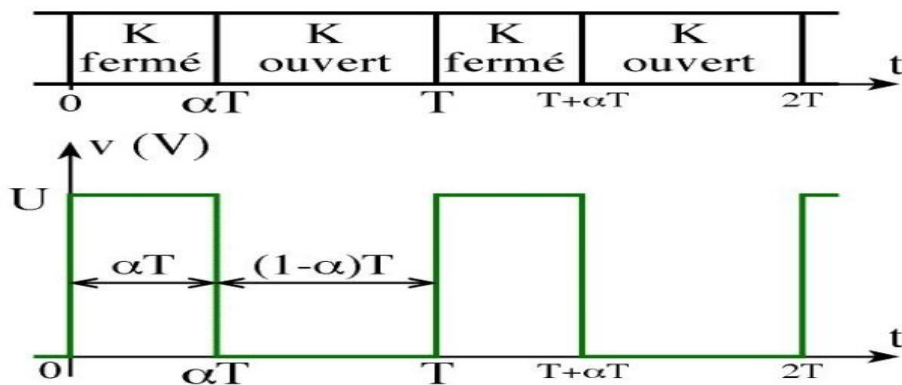


Figure (II.2) : ondes de la tension d'après le Principe du fonctionnement de l'interrupteur

Et comme la valeur moyenne de la tension au bornes de l'inductance est nulle, la tension de sortie est donnée par la relation suivante :  $U_s = \sigma U_e$  .... (1)

❖ **Définition du rapport cyclique :**

Le rapport cyclique (duty cycle) est la caractérisation d'un signal logique que l'on utilise pour faire varier la valeur moyenne d'une tension continue en sortie. Il est défini par la relation suivante :

$$\sigma = \frac{T_{on}}{T} \dots (2) \text{ ou bien } \sigma = \frac{V_s}{V_e}$$

Où,

$T_{on}$  : durée de l'état haut (durée de fermeture de l'interrupteur)

$T$  : la période du signal

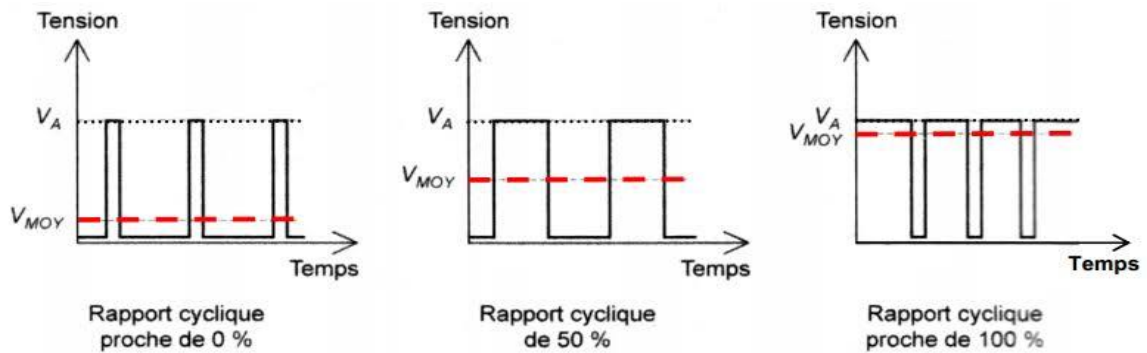


Figure (II.3) : principe du rapport cyclique

Et comme le montage est un abaisseur de tension  $\rightarrow 0 \leq \sigma \leq 1$ , le rapport cyclique est compris entre 0 et 1, pour pouvoir varier la tension de sortie de 0 à  $U_e$

Ce qui est démontré par le schéma des ondes de la tension de sortie suivant :

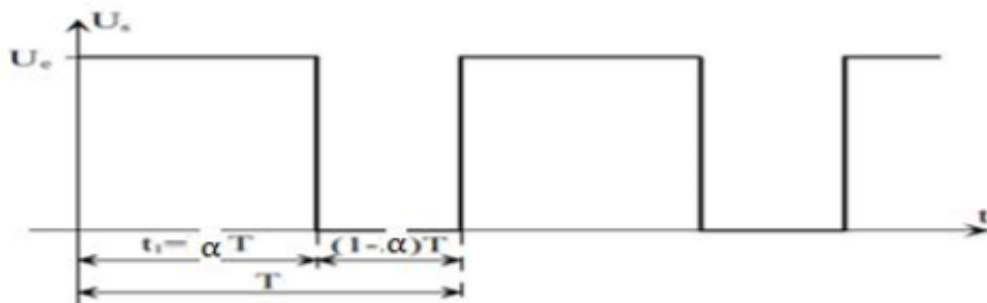


Figure (II.4) : schéma des ondes de tension de sortie de l'hacheur dévolteur

La durée  $t_1$  de conduction de T est comprise entre  $0s$  et  $T$ . Le rapport cyclique est donc en toute logique compris entre 0 et 1.

La valeur moyenne  $\langle U_s \rangle$  est donnée par le calcul suivant :

$$\langle U_s \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T U_s(t) dt$$

$$\langle U_s \rangle = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U_e(t) dt$$

$$\langle U_s \rangle = \frac{1}{T} [U_e]_0^{\alpha T}$$

$$\rightarrow \langle U_s \rangle = \alpha U_e$$

### II.3) Modélisation et dimensionnement de l'hacheur Buck

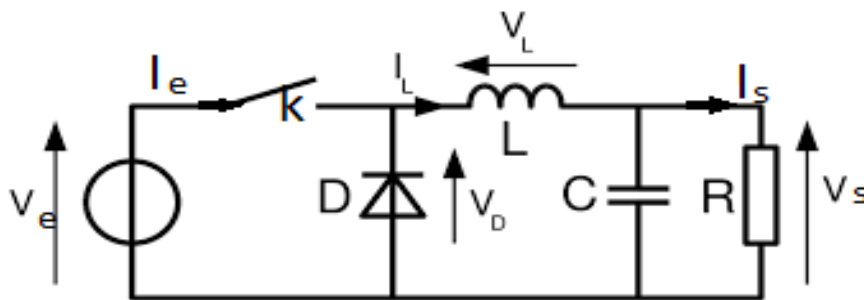


Figure (II.5) : modèle électrique de l'hacheur

D'après la loi des mailles, on synthétise l'expression de la tension de sortie en fonction du courant de sortie  $I_s$ , de la résistance  $R$  et de l'inductance  $L$ , suivante :

$$V_s = R \cdot I_s + L \frac{dI_s}{dt} \quad \dots (3)$$

Pour simplifier la modélisation, on fait calculer les équations caractéristiques du modèle en appliquant les lois de mailles et du nœud, pour les deux séquences de la commutation (On et Off) comme suit :

➤ Pour  $0 \leq t < \alpha T$  : (l'état On)

$$\begin{cases} V_s = L \frac{dI_s}{dt} + V_e \\ I_e = I_L \\ I_D = 0 \\ I_L = C \cdot \frac{dv_s}{dt} + I_s \end{cases} \dots (4)$$

➤ Pour  $\alpha T \leq t < T$  : (l'état Off)

$$\begin{cases} 0 = L \frac{di_s}{dt} + V_e \\ I_e = 0 \\ I_D = I_L \\ I_L = C \cdot \frac{dv_s}{dt} + I_s \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

En combinant (4) avec (5) par une variable discrète  $u$  qui représente l'état logique de l'interrupteur (0 ou 1), on trouve le modèle dynamique suivant :

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = \frac{-1}{L} \alpha + \frac{1}{L} V_e \\ \frac{dv_s}{dt} = \frac{1}{C} \cdot I_L - \frac{1}{R.C} V_s \end{cases} \dots\dots\dots (6) \quad \text{et} \quad \begin{cases} I_s = \alpha \cdot I_L \\ I_D = (1 - \alpha) \cdot I_L \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

### II.3.1) dimensionnement

Le dimensionnement c'est le fait de calculer les dimensions normales ou optimales d'une chose afin de trouver des valeurs aux grandeurs qui caractérisent un système ou un dispositif, de sorte que toutes ces grandeurs satisfassent les contraintes du cahier de charges. Le dimensionnement est basé sur des critères objectifs lors du processus de conception, prendre en compte des lois physiques ou être basés sur des exigences légales.

Pour dimensionner le convertisseur Buck (dévolteur), on a besoin de connaître les critères d'après lesquels on fait le choix de l'inductance et du condensateur de l'hacheur.

#### ➤ Le choix de l'inductance

Comme le convertisseur Buck travaille en mode de conduction continue et vue à la fréquence de commutation élevée, le courant  $I_L$  traversant l'inductance le long d'une période et en régime permanent ne s'annule jamais. L'allure de l'intensité du courant est alors presque linéaire dont les variations sont négligeables.

La figure suivante représente le rechargement et le déchargement de la bobine :

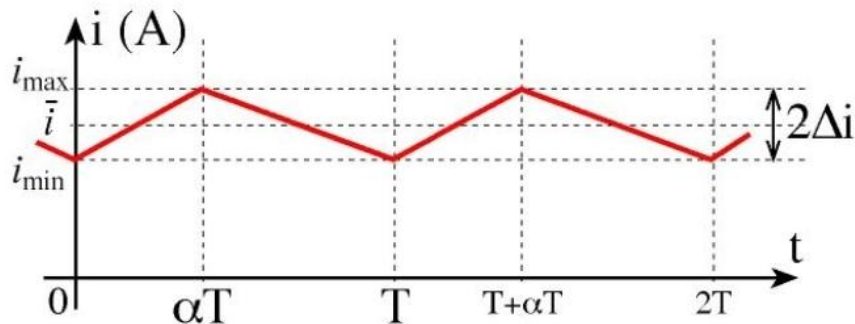


Figure (II.6) : l'allure du courant inductif

Pour calculer l'inductance de la bobine L, on utilise l'équation différentielle (4) de l'état On suivante :

$$V_s = L \frac{dI_s}{dt} + V_e$$

$$\rightarrow \frac{\Delta_{IL}}{t_{on}} = \frac{V_e - V_s}{L} \quad \text{et en remplaçant } t_{on} \text{ par son expression ( } t_{on} = \alpha.T \text{ )}$$

On trouve :

$$\Delta_{IL} = T \cdot \frac{V_s(1-\alpha)}{L}$$

$$\rightarrow \Delta_{IL} = \frac{V_s(1-\alpha)}{L f_{sw}} \quad \dots\dots\dots (8) \quad \text{où } f_{sw} : \text{ la fréquence de commutation}$$

Et pour déduire l'inductance correspondante a un point de fonctionnement nominal ( $V_s, I_L, \alpha$ ), on fait imposer un taux d'ondulation fixe :

$$\rho I_L = \frac{\Delta_{IL}}{I_L} \quad \rightarrow \quad \Delta_{IL} = \rho I_L \cdot I_L \quad \dots\dots\dots (9)$$

En remplaçant (9) dans (8) on retire l'expression de l'inductance correspondante suivante :

$$L = \frac{V_s(1-\alpha)}{\rho I_L \cdot I_L f_{sw}} \quad \rightarrow \quad L = \frac{V_s(1-\alpha)}{\rho I_L \cdot I_s f_{sw}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

- Cette expression précédente de l'inductance est correspondante qu'au point de fonctionnement nominal

Pour vérifier le mode de conduction continue, on doit vérifier que :

$\Delta_{IL} < 2 \cdot I_L$  ; en remplaçant  $\Delta_{IL}$  par son expression (dans l'équation (8)) on trouve :

$$L > \frac{V_s(1-\alpha)}{2 \cdot I_s f_{sw}}$$

Et si on remplace le rapport cyclique par son expression, on obtient :

$$L > \frac{V_s(1-\frac{V_s}{V_e})}{2 \cdot I_s f_{sw}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

C'est la valeur minimale de l'inductance pour un point de fonctionnement quelconque

Dans le tableau simplifié suivant, nous rappelons des équations caractéristiques du fonctionnement d'un hacheur Buck :

Gain en tension	Courant dans l'inductance		Ondulation du courant dans l'inductance
$\alpha = \frac{V_s}{V_e}$	$0 \leq t < \alpha T$	$I_L = \alpha T \cdot \frac{V_e - V_s}{L}$	$\Delta_{IL} = \frac{\alpha(1 - \alpha)V_e}{Lf_{sw}}$
	$\alpha T \leq t < T$	$I_L = (1 - \alpha)T \cdot \frac{-V_s}{L}$	

**Tableau (II.1) :** synthèse des équations décrivant un Buck

➤ **Le choix du condensateur**

Le premier des composants passifs à former le filtre de sortie est le condensateur. Son équation caractérisant son chargement est la même qui caractérise son déchargement, d'après les équations (4) et (5) :

$$I_L = C \cdot \frac{dv_s}{dt} + I_s$$

Pour garder la tension de sortie  $V_s$  lisse voire constante, il est suffisant de fixer une valeur de la capacité assez grande et connue car la détermination d'une valeur de la capacité devient difficile. On peut alors imposer une valeur de l'intervalle [ 4700 $\mu$ F, 100 $\mu$ F ]. Cette valeur imposée est utilisée comme base de calcul pour l'analyse et le dimensionnement du reste des composants.

---

## **Chapitre III : Simulation et résultats**

---

### III.1) introduction

La simulation est une technique de résolution de problèmes. Elle est l'une des méthodes les plus efficaces qui aident les concepteurs et les gestionnaires des systèmes complexes à les étudier d'une manière simple avec des formules mathématiques simplifiées. Elle consiste à construire un modèle virtuel d'un système réel complexe et à conduire des expériences sur ce modèle.

### III.2) modèle du convertisseur DC/DC sur Simulink

Il existe plusieurs méthodes et logiciels de simulation à notre époque, quant à ce projet, nous allons utiliser le Matlab pour simuler le convertisseur Buck précédent

Et à l'aide de Simulink, nous avons construit un modèle pour l'hacheur qui est le suivant :

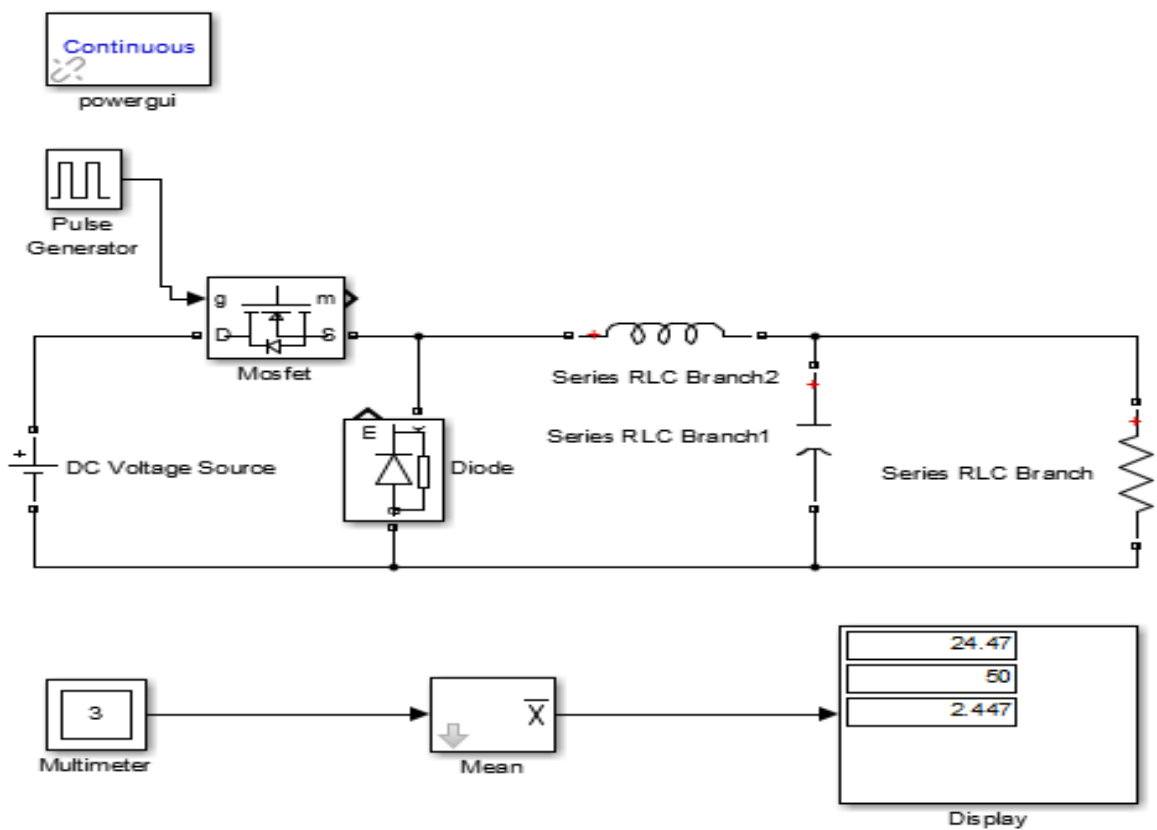


Figure (III.1) : modèle de l'hacheur Buck sur Simulink

➤ Les éléments constituant ce modèle :

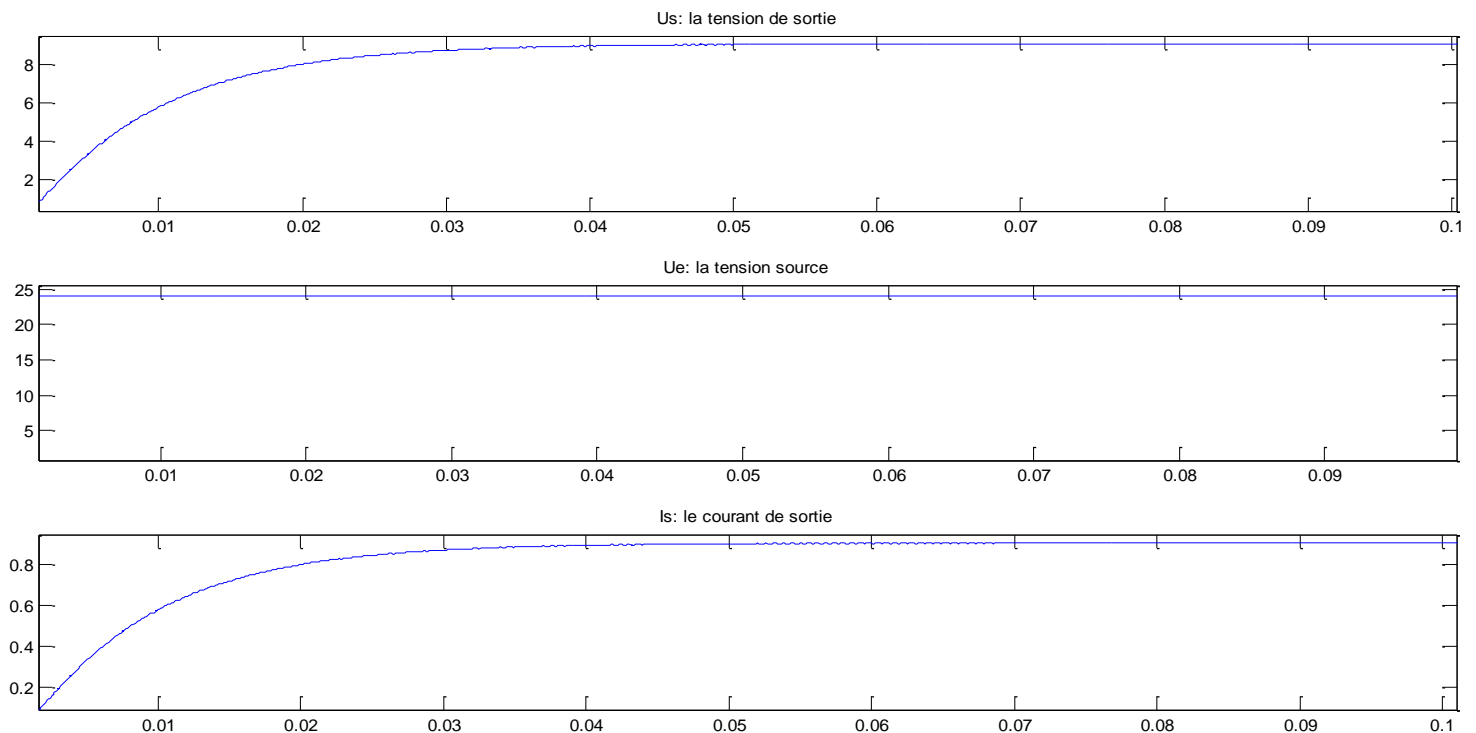
- Une source de tension continue qui alimente le montage.
- Un générateur d'impulsion qui génère le signal rectangulaire de la commande (pwm).
- Un interrupteur Mosfet.
- Une inductance L qui fait lisser du courant de sortie.
- Une diode de roue libre qui assure la continuité du courant dans l'inductance.
- Un condensateur qui lisse la tension de sortie  $V_s$ .
- Une charge résistive.
- Un multimètre qui mesure la tension de l'entrée, la tension la sortie  $V_s$ , et le courant de sortie  $I_s$ .
- Un bloque mean qui reçoit les valeurs mesurées distribuées par le multimètre et fait sortir la moyenne de chacune
- Un afficheur (Display) qui affiche les valeurs moyennes des trois mesurables.

### 1. 1<sup>er</sup> essai :

Les données utilisées :

$$V_e = 24\text{V}; \quad R = 10\ \Omega; \quad C = 100\ \mu\text{F}; \quad L = 0.1\text{H}; \quad f_{\text{sw}} = 1,6\text{kHz}; \quad T = 6 \cdot 10^{-4}; \quad \sigma = 0.40;$$

Résultat de la simulation :



**Figure (III.2) : résultat de la 1ère simulation**

Les valeurs de la tension de sortie, de l'entrée et la valeur du courant de sortie sont respectivement données par l'afficheur suivant :

$$U_e = 24\text{V} ; U_s = 9,1\text{V} ; I_s = 0,91\text{A}$$

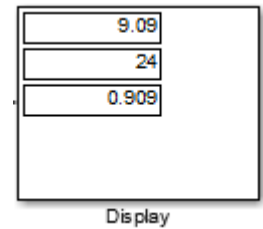
C'est très simple de vérifier ce résultat :

- D'après l'équation (1) :  $U_s = \alpha U_e$

→  $9,1 = \alpha \times 24$  ; et comme  $\alpha = 0,40$  ; la tension de sortie est vérifiée

- Et d'après la loi d'ohm :  $U_s = R_s \cdot I_s$

→  $10 \times 0,91 = 9,1$  ; ( $R = 10\ \Omega$ )



### D'où le résultat de cette simulation est juste

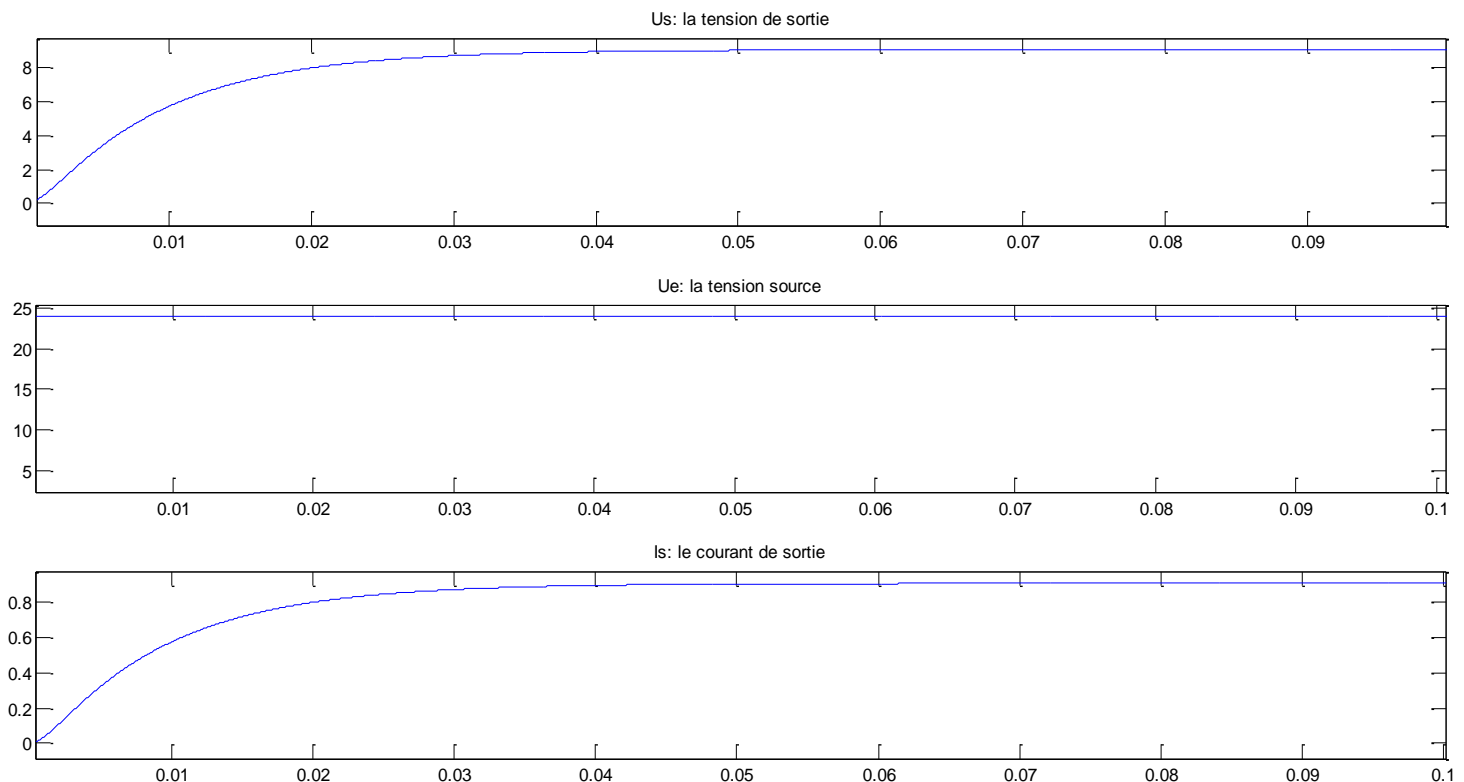
Pour bien comprendre ce système, on fait plusieurs essais en changeant la fréquence et le rapport cyclique

## 2. Essai n° 2:

Pour modifier la fréquence, il suffit de modifier la période T. On prend  $T = 6.10e^{-6}$  →  $f_{sw} = 160\text{KHz}$ .

Les autres valeurs de l'essai précédente restent les mêmes

### Résultat de la simulation :



**Figure (III.3) : résultat de la deuxième simulation**

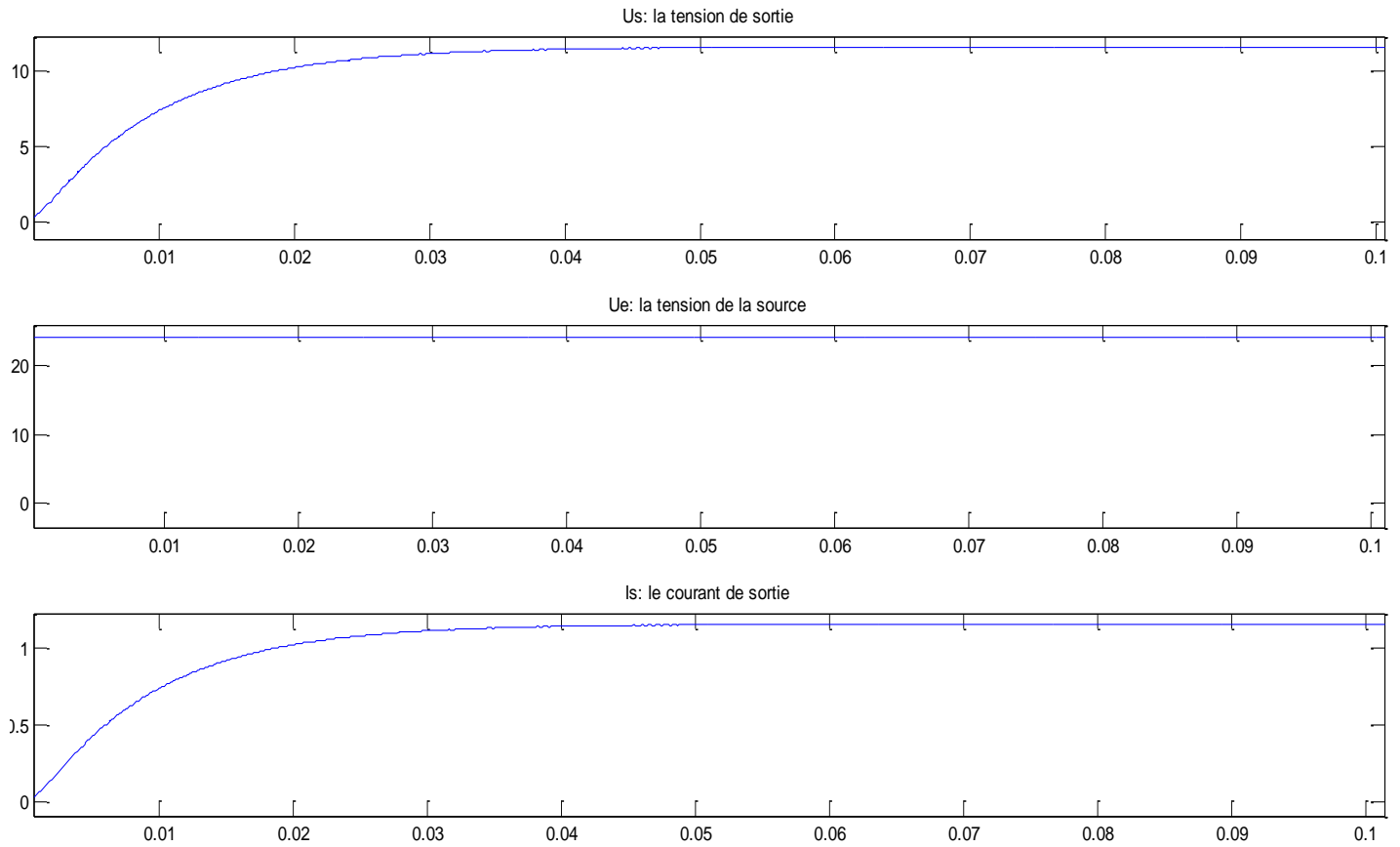
On remarque que les valeurs ne sont pas changées, malgré qu'on a varié la fréquence, mais on remarque aussi que les ondulations sont diminuées dans la courbe de la tension et du courant de sortie.

→ L'augmentation de la fréquence fait lisser l'allure de la tension ainsi que le courant de sortie.

### 3. Essaie n° 3:

Cette fois, on garde toutes les valeurs de la 1<sup>er</sup> essaie ( $f_{sw}= 1,6kHz$  ; et  $T=6..10e^{-4}$ ) et on fait changer le rapport cyclique par la modification du largeur d'impulsion ( $T_{on}= 50\%$  de la période T)

Résultat de la troisième simulation :

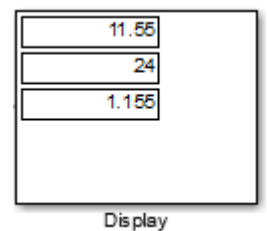


**Figure (III.4) :** résultat de la troisième simulation

On remarque le changement des valeurs de la tension de sortie et du courant de sortie

$$V_e=24v ; V_s= 11,55v ; I_s=1,15A \rightarrow \alpha \approx 0,5$$

On constate aussi la présence des ondulations assez remarquables au niveau de l'allure de la tension et du courant de sortie



## Conclusion:

- ✓ Pour régler la tension de sortie  $V_s$  comme il est souhaitable, il suffit de jouer sur le rapport cyclique  $\sigma$  d'une manière qu'il assure cette tension.
- ✓ Pour obtenir une tension et un courant lisse, et éviter les ondulations au niveau de ces courbes, il faut augmenter la fréquence du hachage  $f_{sw}$ .

## III.3) modèle du convertisseur avec correcteur PI (Boucle fermée)

La technique la plus courante pour assurer un asservissement assez bien, est celle de la commande en boucle fermée. Elle consiste à inclure dans la commande une rétroaction de la mesure (par l'ajout d'une chaîne de retour qui s'appelle aussi chaîne de mesure)

Malgré les incertitudes sur le modèle du système, cette technique peut stabiliser un système instable (c'est l'avantage le plus important), elle peut également garder un certain niveau de performance plus que les correcteurs en boucles ouvertes. L'intérêt de la correction de type intégrale est de permettre une erreur statique nulle.

Afin de suivre la consigne, le signal de cette dernière est intégré dans le correcteur qui se place dans la chaîne de retour. Ce dernier a le rôle de calculer en temps réel, la commande  $u(t)$  par une loi liant  $u(t)$  et l'erreur  $e(t)$  (qui représente la différence entre la consigne et le signal de sortie  $y(t)$ ).

Pour ce convertisseur, on veut que la tension de sortie  $V_s$  reste constante quel que soit la tension d'entrée  $V_e$ . Pour cela, on fait intégrer un correcteur de type intégrateur dans la chaîne de mesure pour assurer cette fonction.

Le modèle du système en boucle fermée dans Simulink, est représenté par la figure suivante :

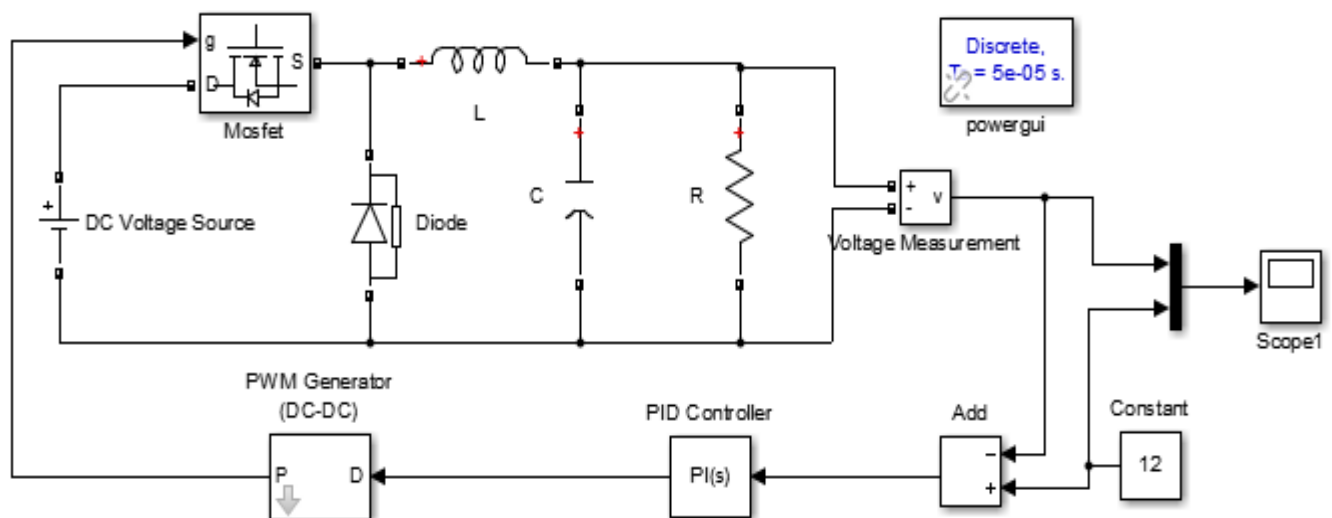


Figure (III.5) : modèle du l'hacheur Buck en boucle fermée sur Simulink

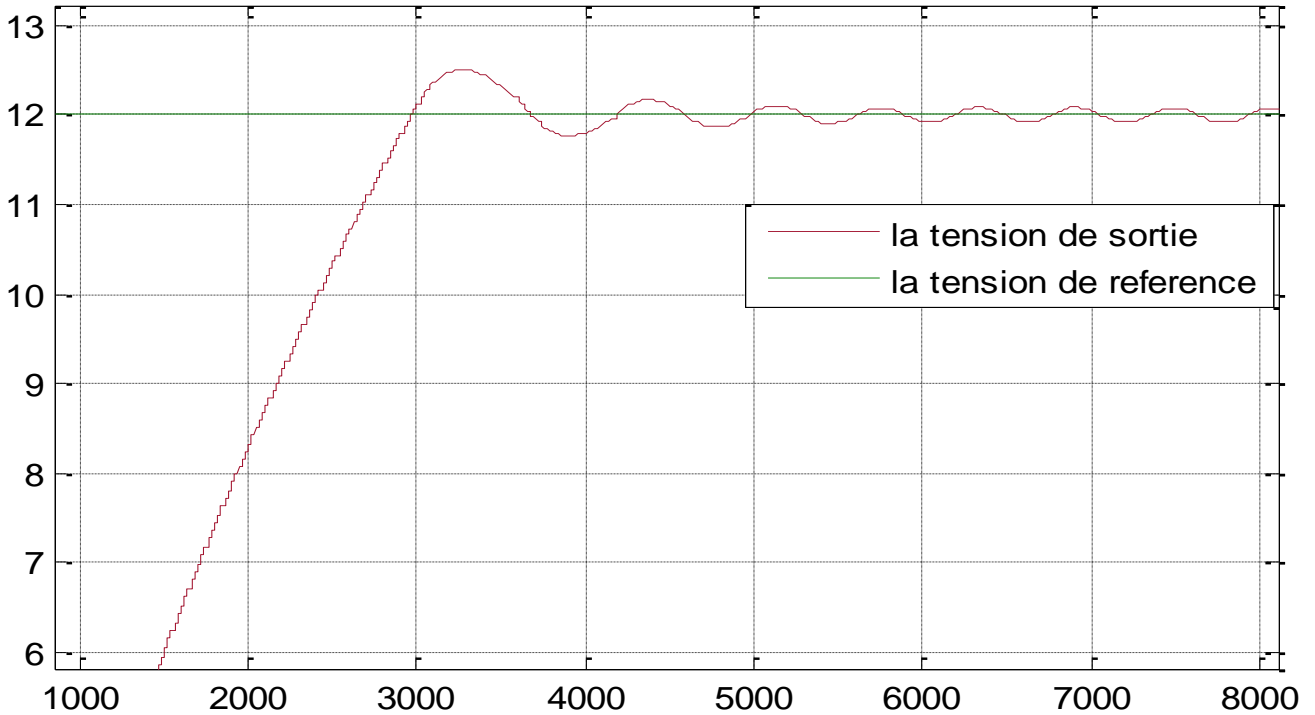
### 1) 1<sup>er</sup> essai :

Les valeurs des composant restent les mêmes que la simulation en boucle ouverte ; avec  $f_{sw}=100\text{kHz}$  ;

Un gain  $k= 1000$  ;

La tension désirée à la sortie est fixée  $V_r=12\text{v}$

#### ➤ Résultats de la 1<sup>ère</sup> simulation :



**Figure (III.6) :** résultat de la 1<sup>ère</sup> simulation en boucle fermée

### Remarque :

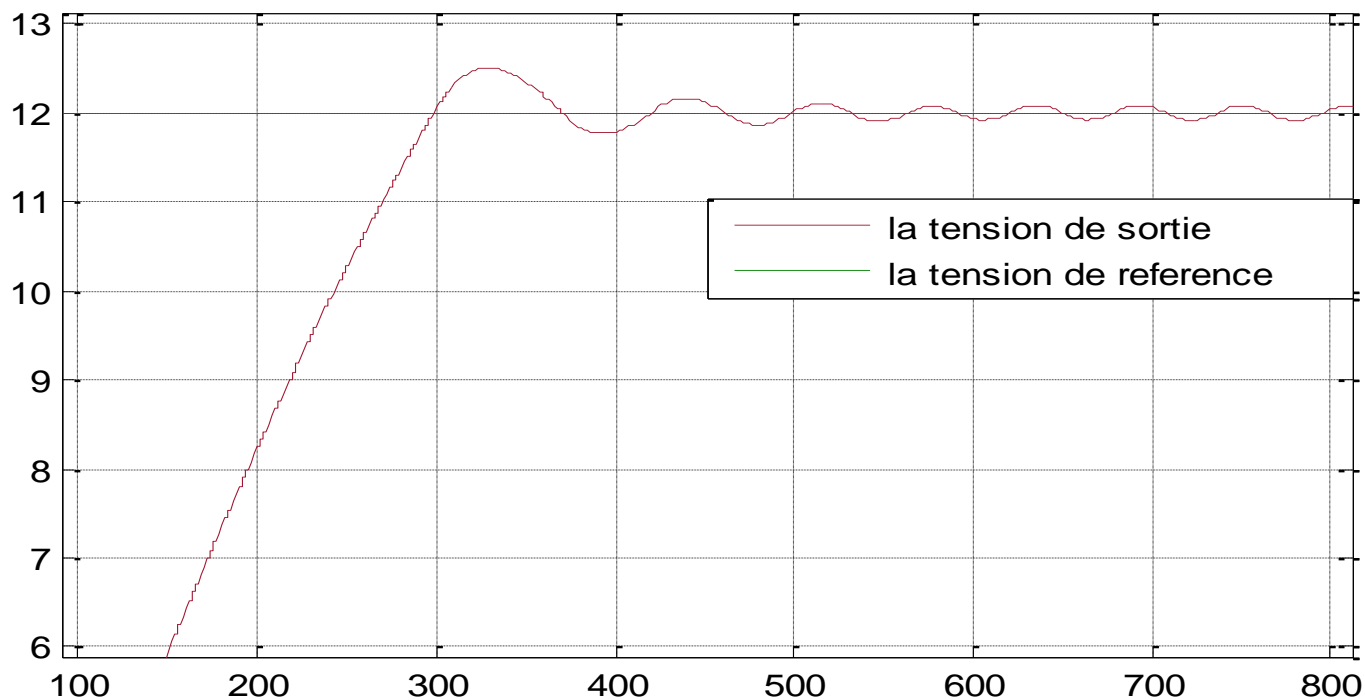
On remarque que le signal de tension de sortie suit totalement le signal de référence que nous avons fixé comme consigne, malgré la présence d'un dépassement au début et des ondulations continuent le long de la simulation. On peut dire que l'asservissement est bien fait par le correcteur PI conventionnel.

Pour diminuer le dépassement et obtenir un temps de réponse minimisé, on joue sur le gain  $K_p$  et la valeur de  $K_I$  du correcteur.

## 2) Deuxième essai :

On garde les valeurs précédentes et on prend  $f_{sw}=10\text{kHz}$

➤ Résultats de la deuxième simulation :



**Figure (III.7) :** résultat de la deuxième simulation en boucle fermée

## Conclusion :

Même par diminution de la valeur de fréquence de coupure, le signal de sortie  $V_s$  reste suivre le signal de référence  $V_r$ .

➔ Avec le correcteur PI le changement de la fréquence de coupure n'entraîne pas l'instabilité du système ou la divergence du signal de sortie  $V_s$ , mais entraîne l'augmentation des ondulations au niveau de l'allure du signal de sortie.

### III.4) modèle du convertisseur avec correcteur flou (Fuzzy logic)

En commandant notre convertisseur DC-DC par un contrôleur flou, on veut que la tension de sortie suit une tension de référence bien déterminée (constante) quel que soit la tension d'alimentation ou les valeurs des composants électriques. C'est le principe de régulation en l'automatique

Le modèle du convertisseur commandé par un contrôleur flou en boucle fermée, est présenté par la figure suivante :

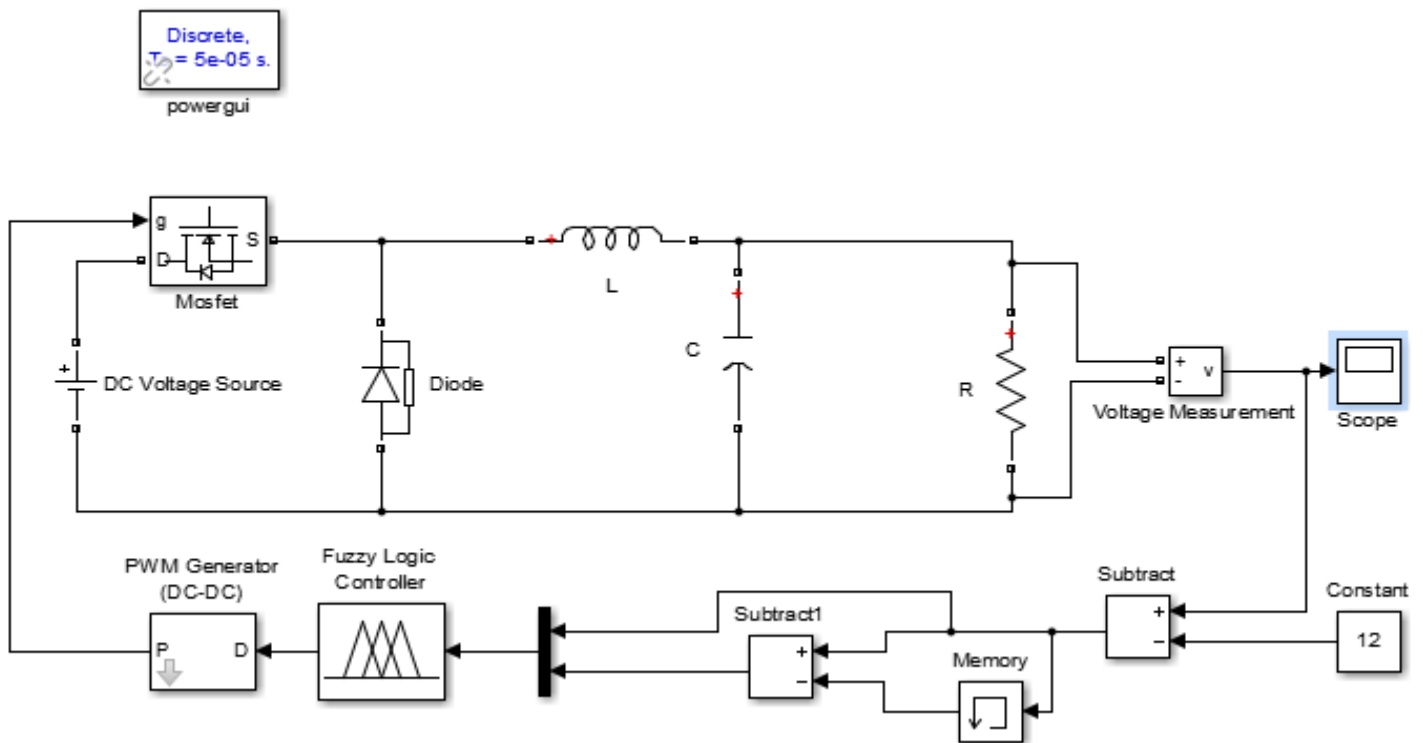


Figure (III.8) : hacheur Buck commandé par un contrôleur flou en boucle fermée sur Simulink

➤ Pour la 1ère simulation, on considère les données suivantes :

$V_e=24v$  ;  $V_r=12v$  ; où  $V_r$  : la tension de référence ;  $R=10 \Omega$  ;  $C=150 \mu F$  ;  $L=0.1H$  ;  $f_{sw}= 30kHz$  ;  
 $T=3,3.10e^{-5}$ ;

➤ Dans la partie du contrôleur flou :

Le bloc du contrôleur comporte deux entrées, une interface d'inférence et une sortie

**Les entrées** : - l'erreur ; - l'erreur conjuguée ; chacune des entrées comporte 7 fonctions d'appartenances

**La sortie** : le rapport cyclique alpha qui comporte aussi 7 fonctions d'appartenances

**L'interface d'inférence** : s'occupe par l'application des règles d'inférence

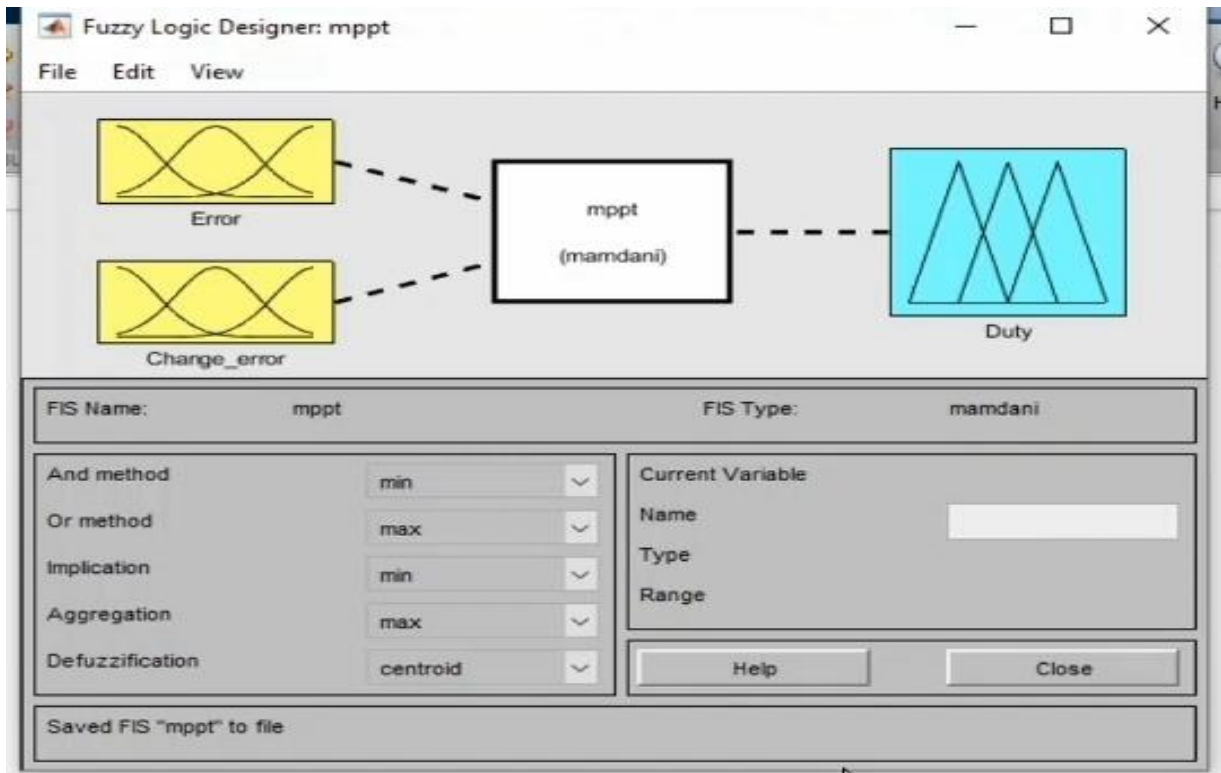


Figure (III.9) : designer du contrôleur flou

➤ Les fonction d'appartenances de chacun des entrées :

NB: negative big; NM: negative medium; Ns: negative small; Z: zero; PS: positive small; PM: positive medium; PB: positive big

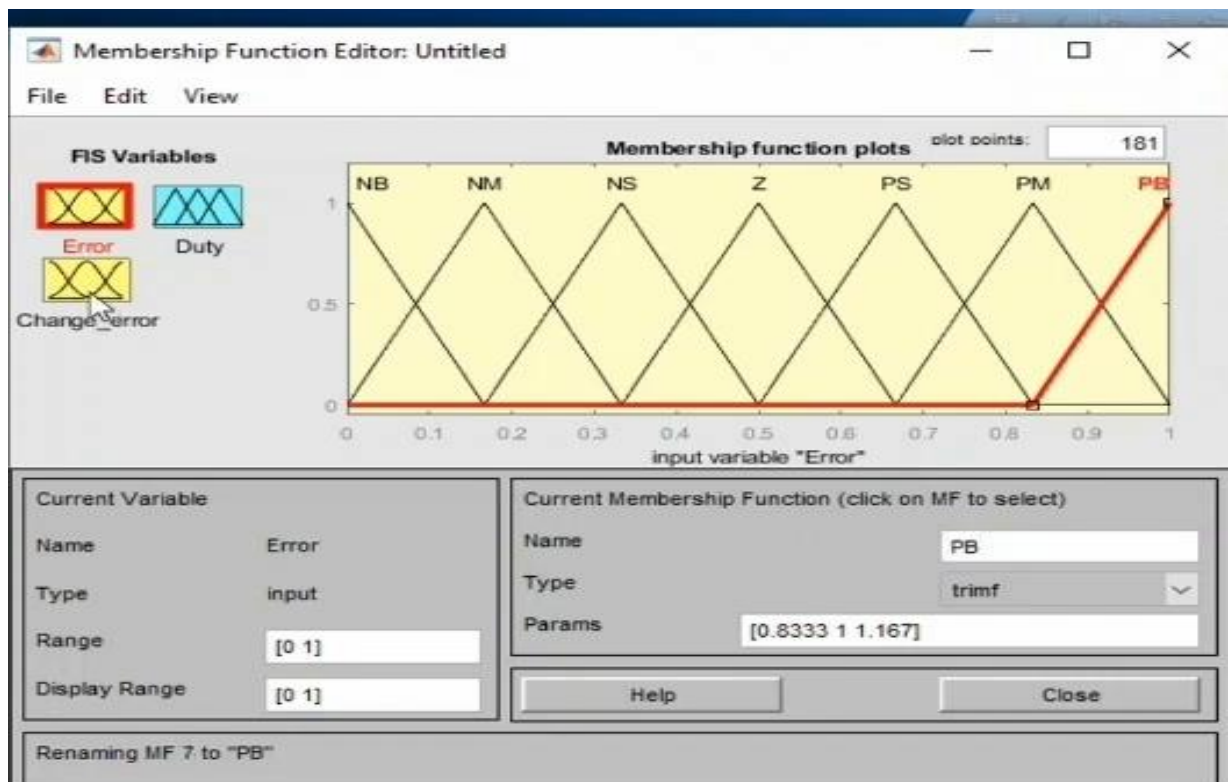


Figure (III.10) : les fonction d'appartenance des entrées du contrôleur

➤ Les règles d'inférence du contrôleur :

On prend  $e$  : l'erreur ;

Et  $e'$  : l'erreur conjuguée ;

$e' \backslash e$	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
NB	0	-5	-50	-100	-100	-100	-100
NM	5	0	-5	-50	-100	-100	-100
NS	50	5	0	-5	-50	-100	-100
Z	100	50	5	0	-5	-50	-100
PS	100	100	50	5	0	-5	-50
PM	100	100	100	50	5	0	-5
PB	100	100	100	100	50	5	0

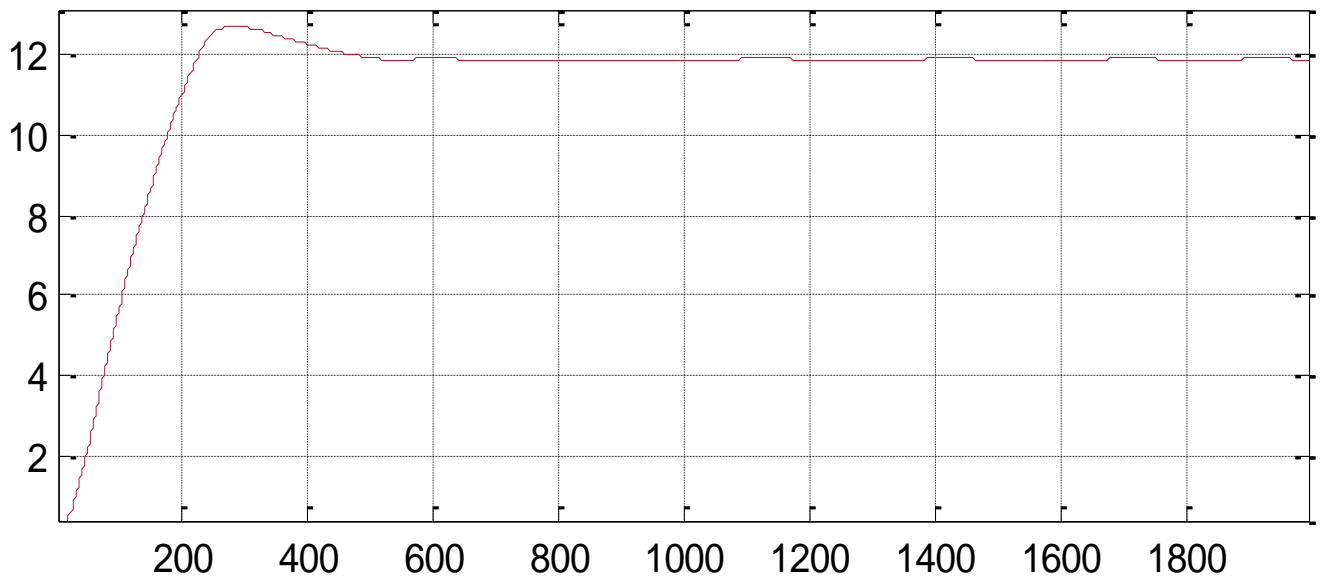
**Figure (III.11) :** les règles d'inférence du contrôleur flou

Ces règles sont évaluées à l'aide de techniques telles que le raisonnement approximatif ou le raisonnement interpolatif.

➤ Exemples de règles d'inférence :

- si  $e'$  est NB et  $e$  est PB alors duty est 0 ;
- si  $e'$  est NB et  $e$  est PM alors duty est -5 ;
- si  $e'$  est NB et  $e$  est PS alors duty est -50 ;
- si  $e'$  est NB et  $e$  est Z alors duty est -100 ;
- si  $e'$  est NB et  $e$  est NS alors duty est -100 ;
- si  $e'$  est NB et  $e$  est NM alors duty est -100 ;
- si  $e'$  est NB et  $e$  est NB alors duty est -100 ;

➤ Résultat de la 1<sup>ère</sup> simulation :

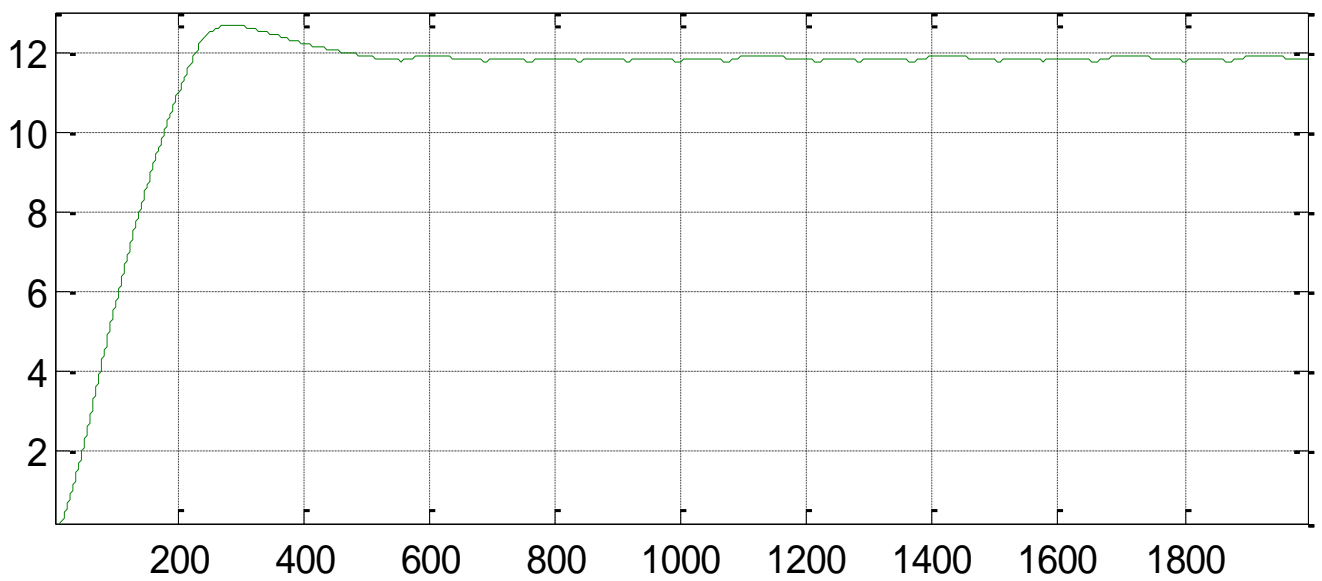


**Figure (III.12) :** Résultat de la 1<sup>ère</sup> simulation avec contrôleur flou

➤ La deuxième simulation :

On prend  $f_{sw}=10\text{Khz}$

Résultat de la simulation :

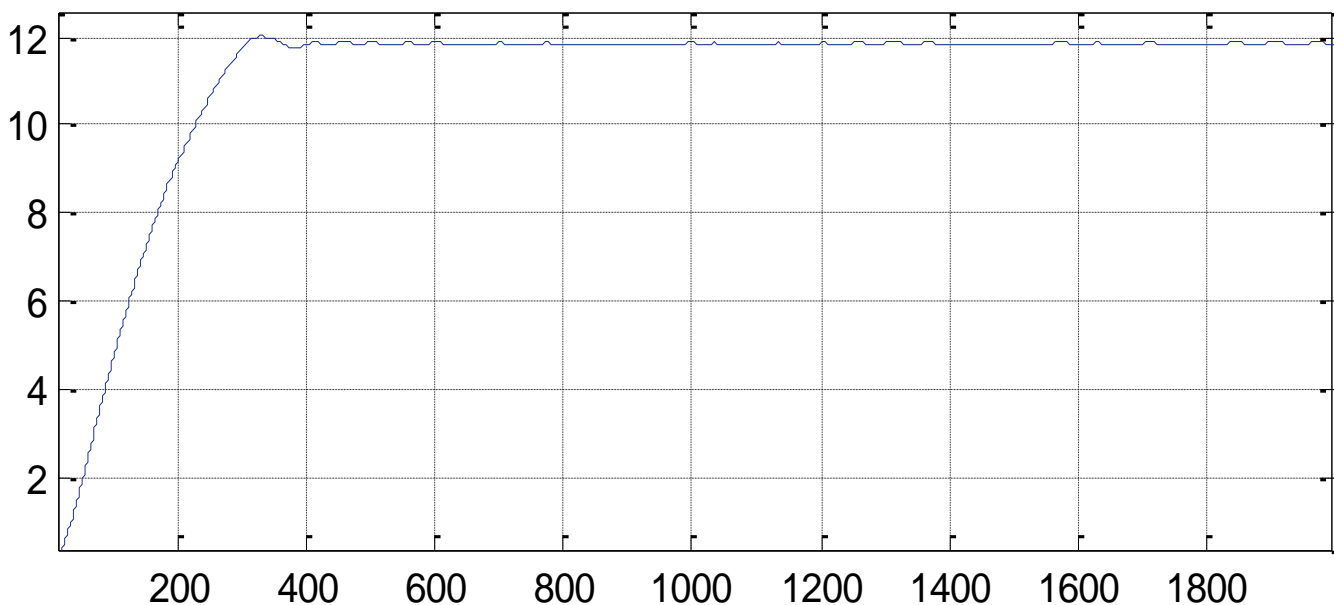


**Figure (III.13) :** Résultat de la deuxième simulation avec contrôleur flou

On remarque qu'aucun changement est survenu au niveau de l'allure de la tension de sortie, malgré qu'on a diminué la fréquence de coupure  $f_{sw}$

➤ La troisième simulation :

On conserve cette fois la fréquence  $f_{sw}=30\text{Khz}$  et on prend  $V_e=20\text{v}$



**Figure (III.14) :** résultat de la troisième simulation avec contrôleur flou

**Conclusion :**

On remarque la présence des ondulations au niveau de l'allure de la tension de sortie mais aussi on remarque bien que la valeur de la tension de sortie est presque constante, la même des deux simulations précédentes

➔ La variation de la fréquence de coupure ou la tension d'alimentation n'a aucune influence pas sur la valeur de la tension de sortie.

➔ L'efficacité de la commande par le contrôleur flou.

➤ **Comparaison entre la commande par un PI et un contrôleur flou :**

Pour faire cette comparaison, on a décidé de mettre les deux systèmes ensemble et suivre le signal de sortie de chacun dans un même scope avec la tension de référence constante, comme suit :

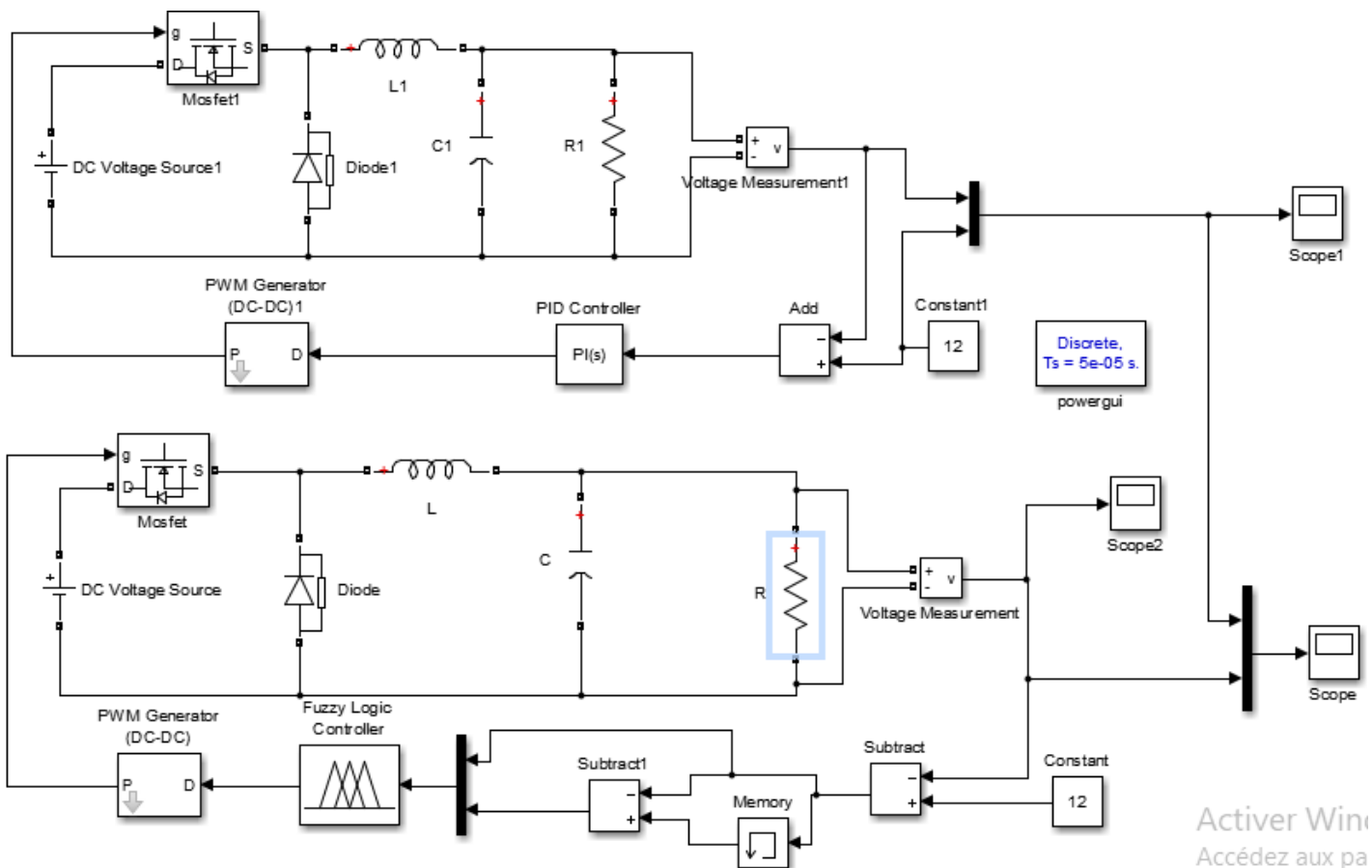


Figure (III.15) : schéma de comparaison entre le correcteur PI et le contrôleur flou

# Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous avons présenté une étude de la commande floue d'un hacheur série (Buck).

Notre objectif c'est de comprendre mieux le fonctionnement d'un hacheur Buck et sur tout son circuit de commande ainsi que le principe de commande par la logique floue.

On a consacré le premier chapitre pour l'état de l'art des convertisseurs statiques et leurs catégories, plus précisément le convertisseur continu-continu de type Buck. Ce même chapitre présente une introduction et quelques explications de la logique floue et le signal Pwm afin de bien comprendre le signal de commande de l'hacheur.

Ensuite, dans le deuxième chapitre on s'occupe par la modélisation de l'hacheur Buck et le dimensionnement des composants constituant ce dernier. La modélisation nous a permis l'obtention des relations de tensions (de l'entrée et de la sortie), du courant et du rapport cyclique. Elle nous a facilité encore le choix de chacun du condensateur et de la bobine pour la réalisation. Cette étape est indispensable, car la conception d'un hacheur nécessite un dimensionnement adapté au cahier des charges bien défini.

Enfin, pour visualiser le fonctionnement de l'hacheur étudié théoriquement, on vient à simuler un modèle de l'hacheur par Simulink Matlab. Ce dernier nous a bien aidé à comprendre le fonctionnement et le démarrage du système en boucle ouverte par lancer plusieurs simulation en jouant sur les valeurs de la fréquence de découpage et le rapport cyclique alpha.

Comme il est prévu théoriquement, les résultats de cette simulation étaient satisfaisants sauf que l'asservissement parfait n'est pas atteint par la commande en boucle fermée. Pour cette raison, on a décidé de simuler le système mais cette fois en boucle fermée, en intégrant un correcteur à la chaîne de mesure ce qui nous assure que la tension de sortie reste constante (définie) peu importe la tension de l'entrée.

Pour un asservissement d'autre type, on a essayé de commander le convertisseur par un contrôleur flou, afin de connaître ses performances. Pour notre charge simple linéaire la commande est bien faite par le correcteur PI, mais si on la remplace par une autre charge non linéaire on va rencontrer des problèmes d'asservissement, et le contrôleur flou sera alors le meilleur contrôle.

Finalement, on peut dire que les hacheurs Buck sont indispensables dans le domaine de l'électronique de puissance et même dans la robotique où une très grande dynamique est exigée. Ils présentent l'avantage de fournir une tension de sortie variable rapidement.

## **Références :**

1. **Cours Tech Pro/** <https://www.courstechpro.com/2019/03/cours-sur-les-hacheurs.html>.
2. **Jacques LECLERECQ** « Techniques-Ingenieur.fr ».2022
3. **Maouche Youcef** « Etude et réalisation d'un hacheur série » memoire de Master -2016.
4. **Soltani Fatma** support de cours « institut d'électrotechnique ».
5. <https://www.electronique-mixte.fr/pwm/2022>
6. <http://www.laplace.univ-tlse.fr/Introduction-a-la-conversion-statique>
7. **D.Abdallah ZAGAOUI** « Université Hassiba ben Bouali de chlef ».
8. **Alain Salles.** These de doctorat, Conception d'éléments passifs magnétiques pour convertisseurs de faible puissance. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2008.
9. <https://www.Electronique-mixte.fr/2016>
10. <https://tutoduino.fr/blog/2022>
11. <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Logique-floue.html/2022>