

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industriel

Par : Benturquia Meryem et Benamar Yousra

Sujet

Régulateur PI flou d'un moteur à courant continu associé à un Buck

Soutenu publiquement, le 13 / 06 / 2024 , devant le jury composé de :

M. Benariba Hassane	MCA	Université de Tlemcen	Président
Mme Kelkoul Bahia	MAB	Université de Tlemcen	Examineur
M. Yacoubi Boumediene	MAA	Université de Tlemcen	Encadreur

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant, Mr. YACOUBI Boumediene, pour son accompagnement attentif, sa disponibilité, son soutien encourageant et ses conseils avisés tout au long de la réalisation de notre mémoire.

Nous exprimons notre gratitude aux membres du jury pour le temps et l'expertise qu'ils consacrent à l'évaluation de ce travail.

Nous exprimons notre profond respect et notre sincère gratitude à tous nos enseignants en Automatique, qui ont été des guides précieux tout au long de notre parcours académique.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de notre projet.

Dédicaces

C'est avec honneur et modestie que nous dédions ce travail en signe de respect et d'appréciation :

À nos chers parents, Nous vous dédions ce mémoire avec une profonde gratitude et un immense respect. Votre amour, vos sacrifices et votre soutien indéfectible ont été notre source d'inspiration et de motivation tout au long de ce parcours académique. Sans vous, rien de tout cela n'aurait été possible.

À nos familles respectives, à nos frères et sœurs, ainsi qu'à nos amis, pour leur soutien inestimable tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Table des matières

Introduction générale	4
1 Modélisation de la machine à courant continu associée au convertisseur statique	5
1.1 Introduction	5
1.2 Modélisation de la machine à courant continu	5
1.2.1 Définition	5
1.2.2 Constitution	6
1.2.2.1 L'inducteur(stator)	6
1.2.2.2 L'induit(rotor)	6
1.2.2.3 Collecteur-Balais	6
1.2.3 Modelisation	7
1.2.3.1 Partie électrique	7
1.2.3.2 Partie mécanique	7
1.2.4 fonctionnement du moteur à courant continu	7
1.3 Généralités sur les hacheurs	8
1.3.1 Hacheur Buck	8
1.4 Association MCC-Hacheur et simulation	10
1.4.1 Moteur-Hacheur 1 quadrant	10
1.4.2 Moteur-Hacheur 2 quadrants	11
1.4.3 Moteur-Hacheur 4 quadrants	12
1.5 Conclusion	14
2 Réglage cascade de vitesse et du couple	15
2.1 Introduction	15
2.2 Théorie du réglage classique	15
2.2.1 Correcteur Proportionnel P [3]	15
2.2.2 Correcteur intégral I [3]	16
2.3 Réglage du couple	17
2.4 Réglage de vitesse	19
2.5 Moteur-Hacheur avec regulateur classique PI	20
2.5.1 Interpretation	23
2.6 Conclusion :	23
3 Régulateur flou de vitesse	24
3.1 Introduction	24
3.2 Définition	24
3.3 Exemple introductif	25
3.4 Les concepts de bases	26
3.4.1 l'ensemble floue	26
3.4.2 les fonctions d'appartenances [2]	26

3.4.3	Les variables et les valeurs linguistiques	27
3.4.4	Univers de discours	27
3.5	Opérateurs de la logique floue [3]	28
3.5.1	Conjonction floue (Opérateur ET)	28
3.5.2	Disjonction floue(Opérateur OU)	28
3.5.3	Complément (Opérateur NON)	29
3.6	Principe d'un Contrôleur Flou	29
3.6.1	Fuzzification	30
3.6.2	Bloc d'inférence	30
3.6.3	Défuzzification	30
3.7	Synthèse de la matrice des regles floues	31
3.8	Transfert des gains du PID classique vers le flou [6]	36
3.9	modification de la structure de regulateur flou	39
3.10	Test de robustesse	41
3.11	Conclusion	42

Conclusion générale **43**

Table des figures

1.1	Constitution du moteur à courant continu [1].	6
1.2	– Les quatre quadrants de fonctionnement d’une machine à courant continu . . .	8
1.3	Schéma de principe du hacheur buck	8
1.4	Chronogramme et circuit dans chaque intervalle	9
1.5	Allure des courants	9
1.6	Schéma simulink d’un moteur commandé par un buck un quadrant	10
1.7	Variation du courant, du couple et de la vitesse	10
1.8	Variation du rapport cyclique de 0.4 à 0.8	11
1.9	Schéma simulink d’un moteur commandé par un buck 2 quadrants	11
1.10	Variation du courant, du couple et de la vitesse	12
1.11	Schéma simulink d’un moteur commandé par un buck 4 quadrants	13
1.12	Variation du courant, du couple et de la vitesse	13
2.1	Schéma de régulateur proportionnel	16
2.2	Schéma de regulateur integral	16
2.3	Schéma du regulateur proportionnel-integral parallèle	17
2.4	Schéma du MCC avec réglage de couple et vitesse	17
2.5	Schéma du MCC avec réglage de vitesse	19
2.6	Moteur-Hacheur 1 quadrant avec régulation classique	20
2.7	Variation du couple résistant et de la vitesse	20
2.8	Moteur-Hacheur 2 quadrants avec régulation classique	21
2.9	Variation du couple résistant et de la vitesse	21
2.10	Moteur-Hacheur 4 quadrants avec regulation classique	22
2.11	Variation du couple résistant et de la vitesse	22
3.1	Classification selon la logique booléenne	25
3.2	Classification selon la logique floue	26
3.3	Operateur ET	28
3.4	Operateur OU	28
3.5	Operateur NON	29
3.6	Les opérations du contrôleur floue [10]	30
3.7	Zones de fonctionnement de l’erreur et variation de l’erreur	31
3.8	Schéma simulink d’un P-flou	36
3.9	Schéma simulink d’un PD flou	36
3.10	Schéma simulink d’un PI flou	37
3.11	Schéma simulink de différentes tables de règles de flou	38
3.12	Variation du couple résistant pour les 3 tables de règle	39
3.13	Schéma simulink des différents régulateurs	40
3.14	Variation du couple résistant avec différents régulateurs	40
3.15	40
3.16	Simulation test de robustesse	41

Liste des tableaux

- 3.1 Table de règle 3-3 33
- 3.2 Table de règle 5-5 34
- 3.3 Table de règle 7-7 35
- 3.4 Table de déplacement de chaque régulateur 41

Liste des symboles

MCC : machine à courant continu.

MCA : machine à courant alternatif.

MS : machine synchrone.

MAS : machine asynchrone.

DC-DC : convertisseur de tension continue.

PD : régulateur proportionnel, dérivé.

PI : régulateur proportionnel, intégral.

PID : régulateur proportionnel, intégral, dérivé.

k : constante de la machine.

U_a : tension de l'induit.

R_a : résistance de l'induit.

D : diode de roue libre.

I_a : courant de l'induit.

Φ : flux dans l'entrefer.

C_e : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant.

K_c : Constante du couple.

K_v : Constante de la FEM.

f : frottement visqueux.

Ω, n : vitesse respectivement en $\text{rad}\cdot\text{sec}^{-1}$ et $\text{tr}\cdot\text{mn}^{-1}$

P : puissance mécanique de la machine.

E : force électromotrice.

L_a : inductance de l'induit.

U_s : tension aux bornes de la charge.

L : inductance de lissage du courant dans DC-DC.

C : capacité de filtrage.

K : interrupteur de convertisseur.

I_L : courant à travers l'inductance de lissage.

I_R : courant à travers la résistance.

I_C : courant à travers la capacité de filtrage.

T : période de hachage.

U_{smoy} : valeur moyenne de U_s

α : rapport cyclique.

U_e : tension d'entrée du hacheur.

T_m, T_e : respectivement constante de temps de la partie mécanique et de la partie électrique de la machine.

k_p : gain proportionnel du régulateur PI.

ϵ : l'erreur de commande du régulateur.

s : opérateur de la place .

$G_e(S), G_m(S)$: respectivement Fonction de transfert de la partie électrique et partie mécanique.

ξ : facteur d'amortissement.

μ_A, μ_B : fonctions d'appartenances.

ce : changement d'erreur.

e : l'erreur.

Gu : le gain de normalisation de la commande du régulateur flou.

N : négative.

P : positive.

Z : zero.

NS : negative small.

NM negative moyen.

NL negative large.

PS : positive small.

PM : positive moyen.

PL : positive large.

Introduction générale

Jouant un rôle crucial dans notre quotidien, les machines électriques sont largement utilisées tant dans les applications domestiques qu'industrielles. Selon leur mécanisme de fonctionnement, les machines électriques se répartissent en deux catégories : les machines à courant continu (MCC) et les machines à courant alternatif (MCA), incluant les machines synchrones (MS) et asynchrones (MAS).

La régulation des systèmes est désormais très répandue. Historiquement, les MCC étaient employées comme variateurs de vitesse et ont connu un essor considérable. De nombreuses stratégies de régulation ont été développées, telles que la régulation par PI avec la Modulation de Largeur d'Impulsion, une méthode linéaire, ainsi que des méthodes non linéaires comme la régulation basée sur la logique floue.

Ce travail vise à étudier et simuler la régulation d'une machine à courant continu couplée à un convertisseur DC-DC de type buck . Cependant le réglage du processus est composé de deux régulateurs en cascade :

1. Régulateur de vitesse,boucle externe
2. Régulateur de couple,boucle interne.

Le réglage externe peut être un régulateur classique de type PI ou un régulateur flou PD,PID.

Ce mémoire sera structuré de la manière suivante :

Le premier chapitre portera sur l'étude théorique du processus à réguler. Nous y explorerons le principe de fonctionnement de la machine à courant continu, et sa modélisation mathématique ainsi que ses différents quadrants de fonctionnement ;Nous présenterons également le convertisseur DC-DC buck associé au différents types des hacheurs en boucle ouverte .

Dans le deuxième chapitre, nous examinerons la théorie de la commande classique. Nous énumérerons les diverses actions correctives (proportionnelle, intégrale, dérivée) et illustrerons leurs impacts sur le processus de régulation Nous présenterons aussi la même association en boucle fermée. Dans le dernier chapitre, Nous définirons la logique floue que nous allons utiliser par la suite pour établir un régulateur pour notre processus. Ce chapitre sera consacré à la théorie sur laquelle repose le fonctionnement d'un régulateur flou, en précisant les étapes par lesquelles passe la grandeur physique à réguler, ainsi que l'étude d'un système PI-flou.

Chapitre 1

Modélisation de la machine à courant continu associée au convertisseur statique

1.1 Introduction

La machine à courant continu est l'une des technologies les plus anciennes et essentielles dans le domaine de l'électromécanique. Elle convertit l'énergie électrique en énergie mécanique, et vice versa, grâce à l'utilisation d'un courant électrique continu. Cette machine a joué un rôle crucial dans le développement de nombreuses industries, notamment dans les secteurs de l'automatisation, des transports et de la production d'énergie.

Initialement, les machines à courant continu étaient largement utilisées dans les applications industrielles, offrant un contrôle précis de la vitesse et du couple. Bien que leur usage ait été en partie supplanté par des technologies plus récentes, comme les moteurs à courant alternatif, elles demeurent pertinentes dans certaines applications nécessitant des caractéristiques de contrôle spécifiques. Les hacheurs, ou convertisseurs DC-DC, sont des dispositifs de conversion statique qui modifient une tension continue en une autre par une méthode de commutation, utilisant des interrupteurs électroniques tels que les transistors pour réguler le flux d'énergie.

Un moteur à courant continu est un type de moteur électrique où le courant circule dans un seul sens, générant un couple de rotation. L'association moteur-hacheur permet de contrôler la vitesse du moteur en modulant la tension ou le courant appliqué. Le hacheur agit comme un régulateur, ajustant la quantité d'énergie électrique fournie au moteur.

En modifiant le rapport cyclique (le temps d'activation par rapport au cycle total) ou la tension moyenne appliquée, on peut augmenter ou diminuer la vitesse du moteur. Cette combinaison est couramment utilisée dans de nombreuses applications industrielles nécessitant une régulation précise de la vitesse, telles que les convoyeurs, les machines-outils, les véhicules électriques et les systèmes de ventilation. Elle permet un réglage précis et efficace de la vitesse du moteur tout en optimisant la gestion de l'énergie.

1.2 Modélisation de la machine à courant continu

1.2.1 Définition

Les moteurs à courant continu sont d'importants convertisseurs d'énergie électromécaniques qui convertissent l'énergie électrique reçue en énergie mécanique lorsque cela est nécessaire pour alimenter et propulser des charges en mouvement. Dans cette configuration, ils agissent comme des moteurs électriques et déplacent l'appareil qu'ils entraînent.

Lorsqu'il est exposé à une charge tournante, les rôles sont inversés et l'énergie mécanique absorbée est convertie en énergie électrique. Dans ce contexte, ils agissent comme des géné-

rateurs, fournissant de l'énergie en fonction du mouvement de la charge qu'ils entraînent. La capacité bidirectionnelle des moteurs à courant continu à convertir l'énergie entre les formes électriques et mécaniques les rend précieux dans une variété d'applications où une flexibilité et un contrôle précis de la puissance sont requis.[1]

1.2.2 Constitution

Dans la constitution d'un moteur à courant continu, plusieurs composants sont indispensables :

- L'inducteur.(stator)
- L'induit.(rotor)
- Le dispositif collecteur / balais.

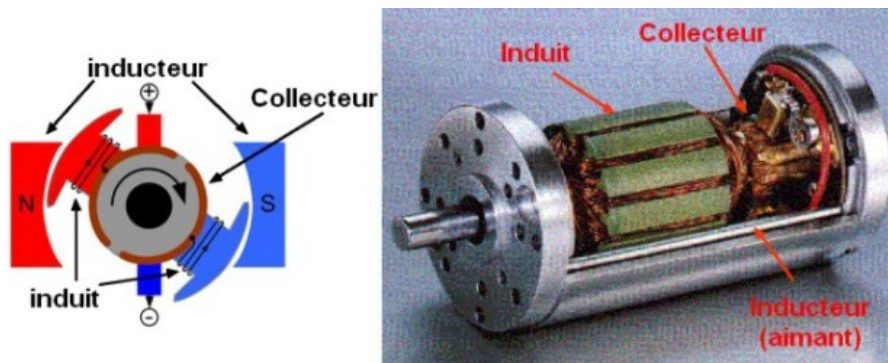


FIGURE 1.1 – Constitution du moteur à courant continu [1].

1.2.2.1 L'inducteur(stator)

C'est une partie fixe du moteur et génère le champ magnétique nécessaire au fonctionnement du moteur. Il se compose généralement d'un ou plusieurs enroulements de fil de cuivre enroulés autour d'un noyau ferromagnétique. L'inducteur crée un champ magnétique stable dans lequel le rotor (la partie mobile du moteur) peut tourner. Le courant électrique circule à travers l'inducteur pour créer un champ magnétique [1].

1.2.2.2 L'induit(rotor)

Le rotor d'une machine à courant continu est une pièce clé qui transforme l'énergie électrique en mouvement mécanique.

Constitué d'un ensemble d'enroulements électriques montés sur un support rotatif appelé collecteur, il génère un champ magnétique lorsque le courant électrique circule à travers ses bobines. Ce champ magnétique interagit avec celui produit par le stator, assurant la rotation du rotor[1].

1.2.2.3 Collecteur-Balais

Les balais frottent avec le collecteur en rotation assurant le passage du courant continu entre l'alimentation et le bobinage de l'induit, le collecteur de sa part présente un ensemble de lames en cuivre reliées avec les extrémités du bobinage de l'induit [3]. Le dispositif collecteur/balais permet donc de faire circuler un courant dans l'induit [3]

1.2.3 Modelisation

1.2.3.1 Partie électrique

$$U_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \quad (1.1)$$

Avec :

$$E = k\phi\Omega \quad (1.2)$$

Et si le flux est constant :

$$E = k'\Omega \quad (1.3)$$

Dans le domaine de la place on a :

$$U(s) = R_a I(s) + L_a s I(s) + E \Rightarrow U(s) - E = (R_a + L_a s) I(s) \quad (1.4)$$

$$U(s) - k'\Omega = (R + Ls) I(s) \Rightarrow \frac{I(s)}{U(s) - k'\Omega} = \frac{1}{R + Ls} \quad (1.5)$$

1.2.3.2 Partie mécanique

En appliquant la loi de la dynamique des masses tournantes l'équation mécanique exprimant les couples agissant sur le rotor est formulée comme suit :

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (1.6)$$

Avec :

$$C_e = k\phi I_a = k' I_a \quad (1.7)$$

Dans le domaine de la place on a :

$$\frac{\Omega}{C_e - C_r} = \frac{1}{f + Js} \quad (1.8)$$

1.2.4 fonctionnement du moteur à courant continu

Cette machine peut transformer l'énergie électrique en énergie mécanique et vice versa, fonctionnant de manière réversible.

Selon les directions du couple et de la vitesse, on distingue quatre modes de fonctionnement, que l'on appelle quadrants :

— Quadrant Un :

Couple positif et vitesse de rotation positive, la machine fonctionne en moteur :

$$P_m = C\Omega > 0$$

— Quadrant Deux :

Couple négatif et vitesse de rotation positive, la machine fonctionne en génératrice frein :

$$P_m = C\Omega < 0$$

— Quadrant trois :

Couple négatif et vitesse de rotation négative, la machine fonctionne en moteur :

$$P_m = C\Omega > 0$$

— Quadrant Quatre :

Couple positive et vitesse de rotation négative, la machine fonctionne en génératrice frein :

$$P_m = C\Omega < 0$$

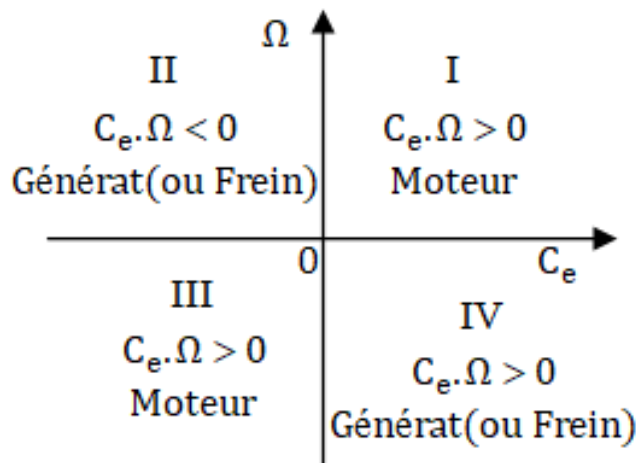


FIGURE 1.2 – Les quatre quadrants de fonctionnement d'une machine à courant continu

1.3 Généralités sur les hacheurs

Il existe plusieurs configurations des convertisseurs DC-DC ou hacheurs, parmi lesquelles on peut citer :

- Hacheur buck (hacheur abaisseur).
- Hacheur boost (hacheur élévateur).
- Hacheur buck-boost (abaisseur-élévateur)
- hacheur Ćuk.

Dans notre travail nous avons utilisé la commande du moteur par un Buck.

1.3.1 Hacheur Buck

Ce hacheur commande le débit d'une source de tension vers une charge de courant, permettant de convertir la tension d'entrée en une tension de sortie réduite .

Le schéma de principe est illustré par la figure ci-dessous :

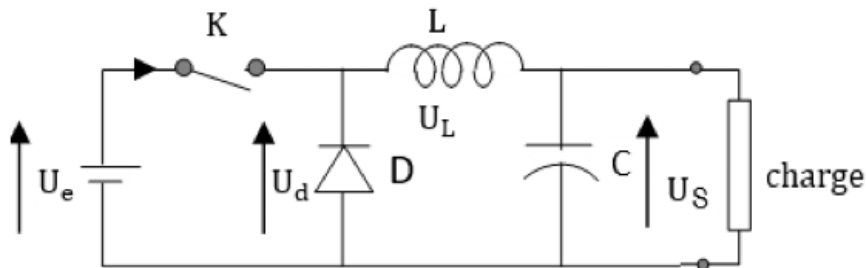


FIGURE 1.3 – Schéma de principe du hacheur buck

Le cycle de fonctionnement :

Dans une période de hachage T , se compose de deux intervalles :

- $0 < t < \alpha T$: K fermé et D bloquée

$$U_s = U_e - L \frac{dI_L}{dt} \quad (1.9)$$

— $\alpha T < t < T$: k ouvert, D est passante

$$I_L = I_R + I_C \quad (1.10)$$

$$U_s = L \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{C} \int I_C dt = RI_R \quad (1.11)$$

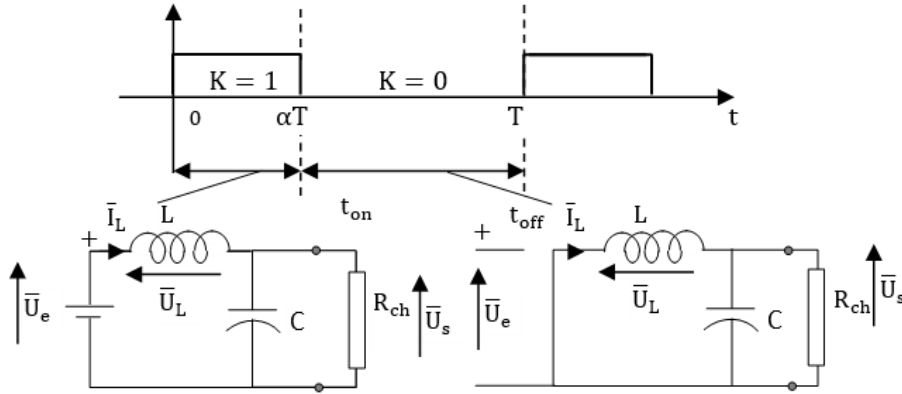


FIGURE 1.4 – Chronogramme et circuit dans chaque intervalle

$$U_{\text{smoy}} = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U_e dt + \int_{\alpha T}^T 0 dt = \alpha U_e \quad (1.12)$$

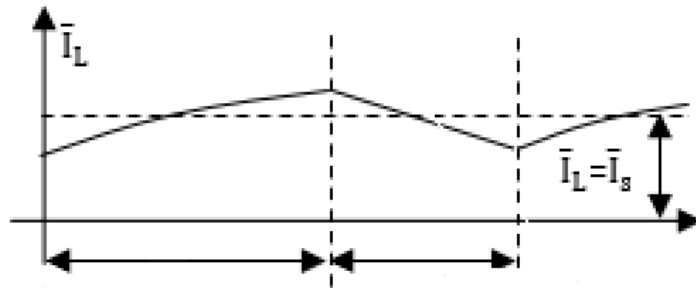


FIGURE 1.5 – Allure des courants

1.4 Association MCC-Hacheur et simulation

Les simulations sous matlab simulink du système utilisant différents quadrants de fonctionnement sont illustrés par les figures ci-dessous :

1.4.1 Moteur-Hacheur 1 quadrant

La figure ci-dessous donne le schéma simulink d'un moteur commandé par un buck un quadrant :

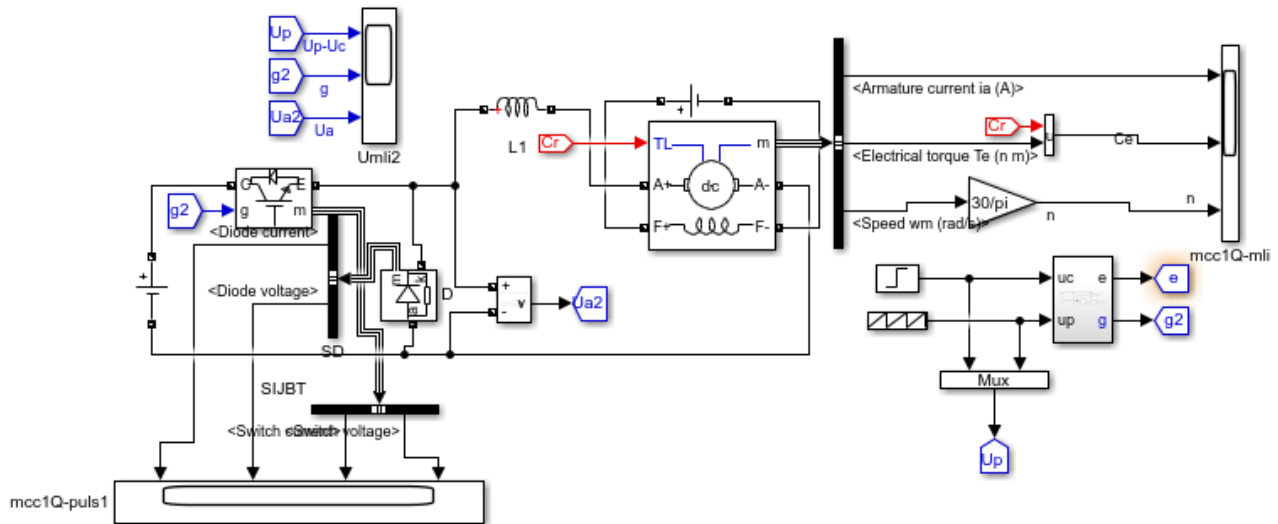


FIGURE 1.6 – Schéma simulink d'un moteur commandé par un buck un quadrant

Les résultats de simulations sont donnés par la figure ci-dessous :

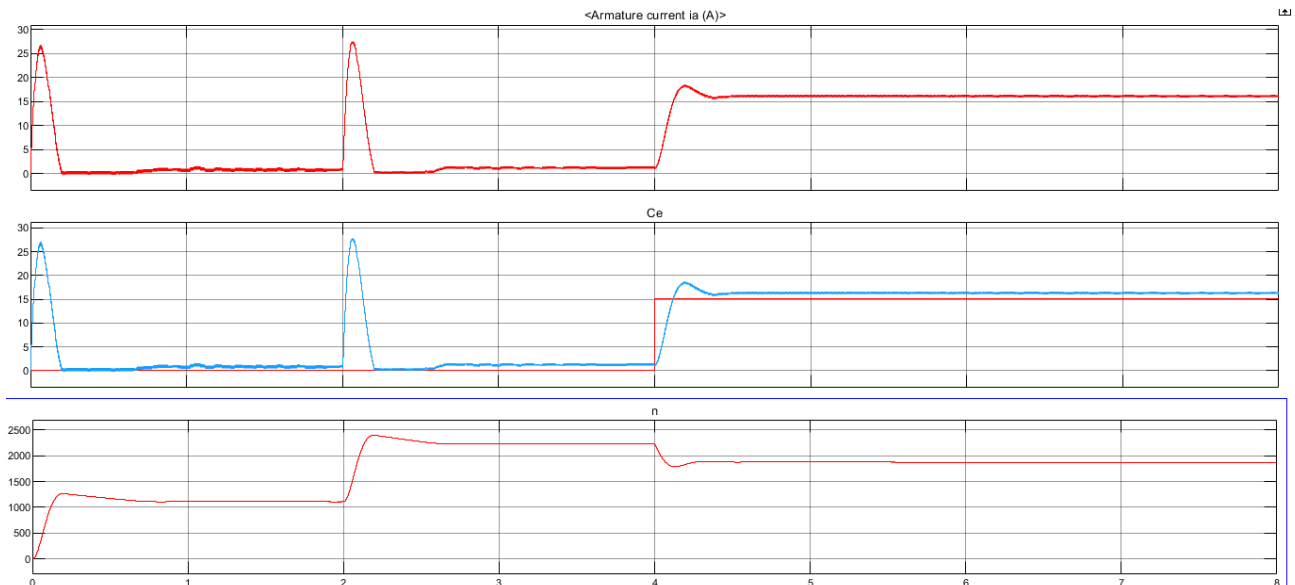


FIGURE 1.7 – Variation du courant, du couple et de la vitesse

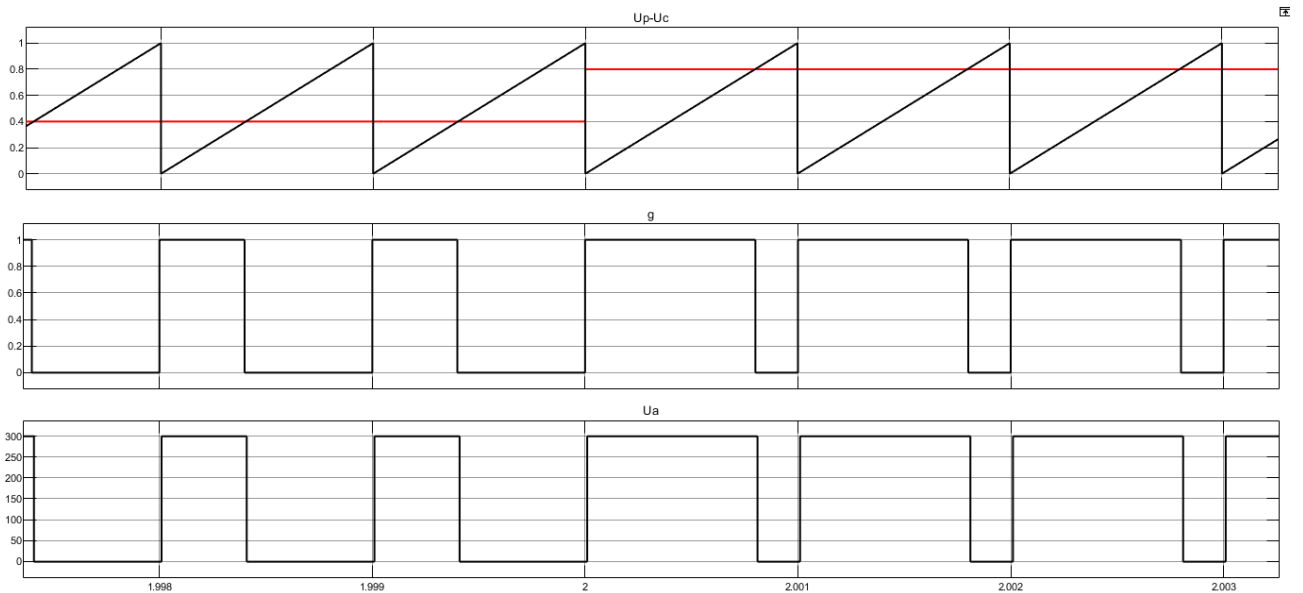


FIGURE 1.8 – Variation du rapport cyclique de 0.4 à 0.8

Interpretation

1. Moteur à vide $C_r = 0\text{N.m}$
 - $\alpha = 0.4$, $n = 1108\text{tr.mn}^{-1}$
 - $\alpha = 0.8$, $n = 2234\text{tr.mn}^{-1}$
2. Moteur en charge $C_r = 15\text{N.m}$, $\alpha = 0.8$ et $n = 1872\text{tr.mn}^{-1}$

1.4.2 Moteur-Hacheur 2 quadrants

La figure ci-dessous donne le schéma simulink d'un moteur commandé par un buck deux quadrants :

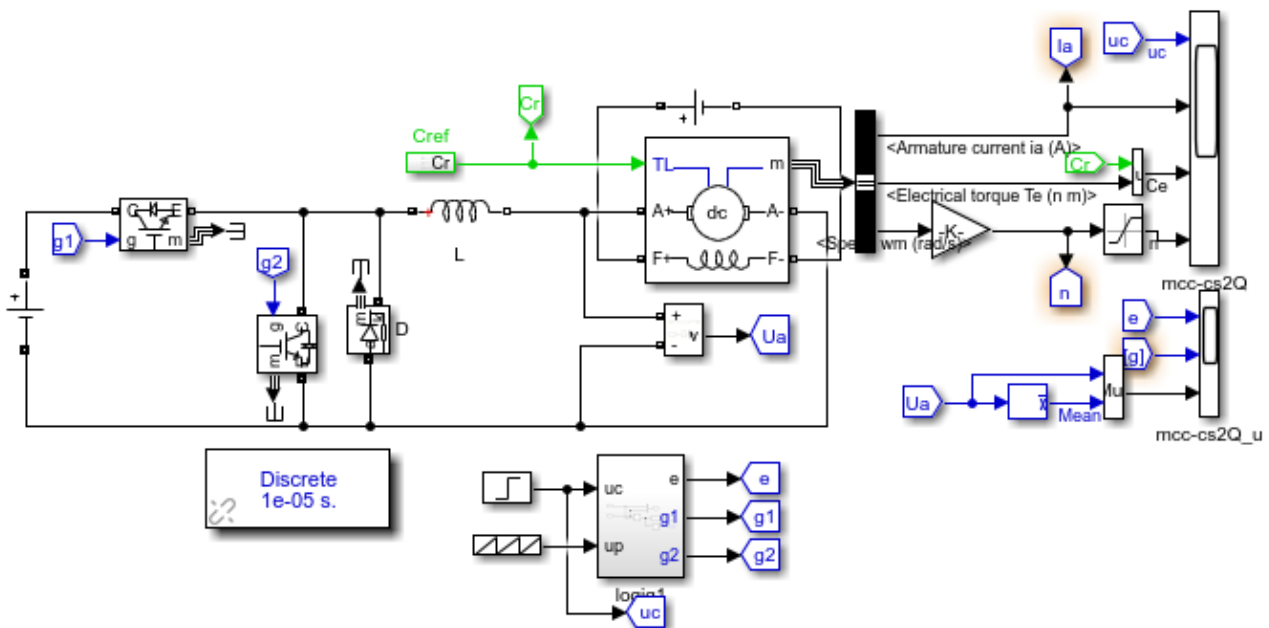


FIGURE 1.9 – Schéma simulink d'un moteur commandé par un buck 2 quadrants

Les résultats de simulations sont donnés par la figure ci-dessous :

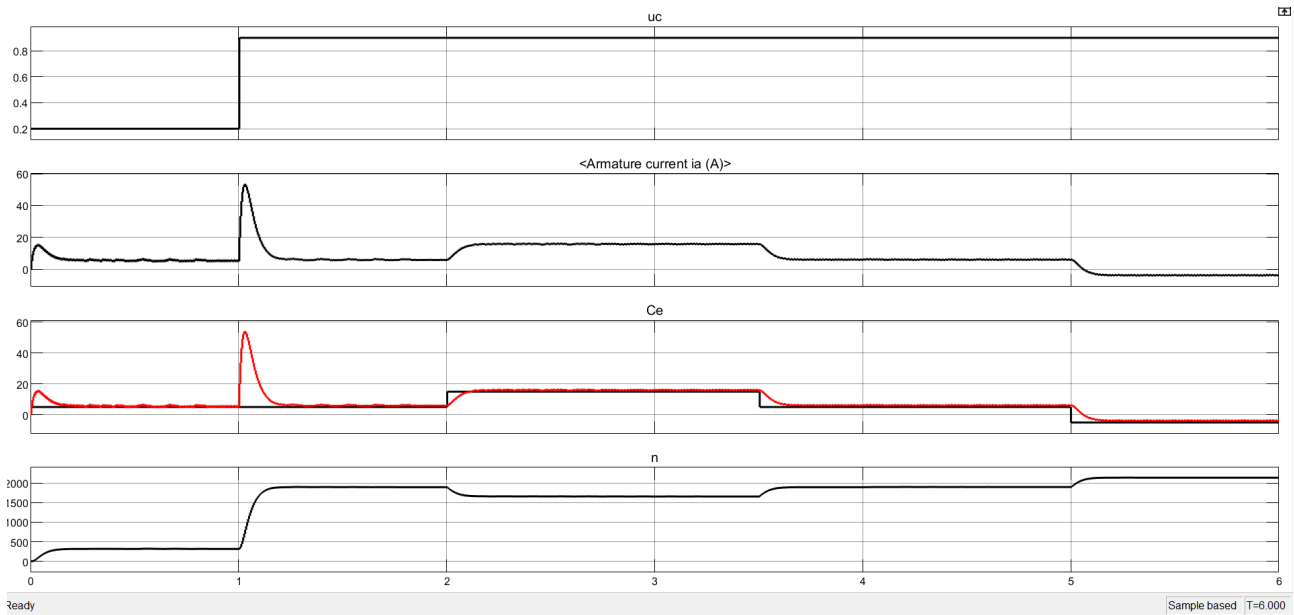


FIGURE 1.10 – Variation du courant, du couple et de la vitesse

Interpretation

1. moteur à vide $C_r = 0\text{N.m}$
 - $\alpha = 0.2$, $n = 320\text{tr.mn}^{-1}$
 - $\alpha = 0.9$, $n = 1900\text{tr.mn}^{-1}$
2. moteur en charge :
 - $C_r = 15\text{N.m}$, $\alpha = 0.9$ et $n = 1650\text{tr.mn}^{-1}$
 - $C_r = -5\text{N.m}$, $\alpha = 0.9$ et $n = 2135\text{tr.mn}^{-1}$

1.4.3 Moteur-Hacheur 4 quadrants

La figure ci-dessous donne le schéma simulink d'un moteur commandé par un buck quatres quadrants :

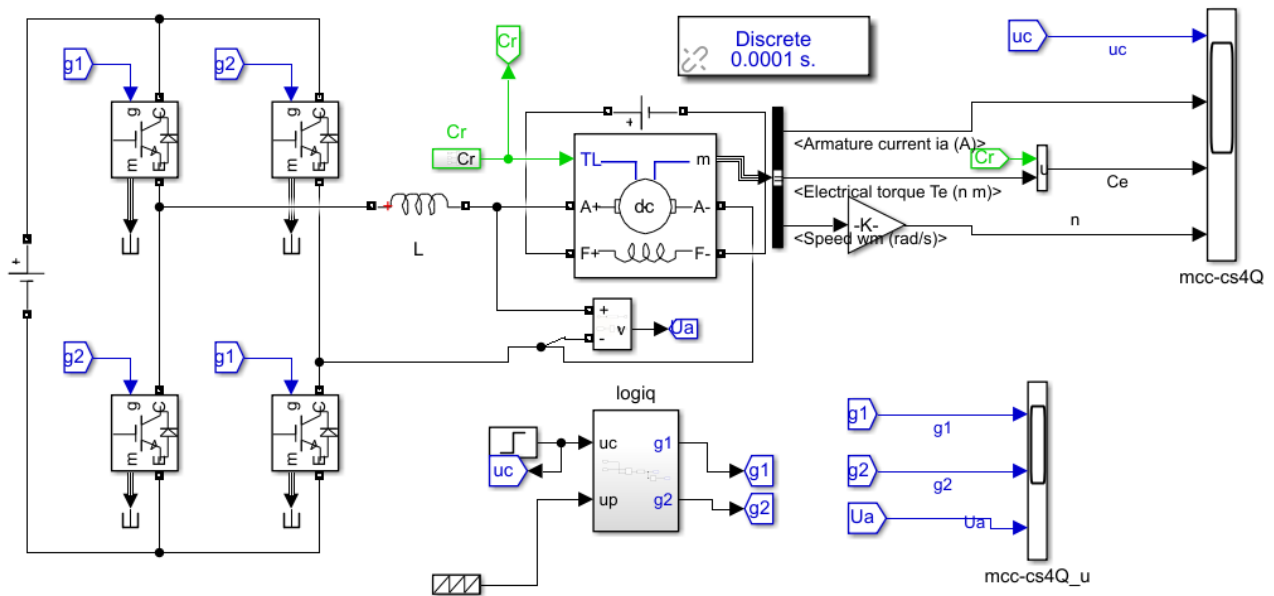


FIGURE 1.11 – Schéma simulink d'un moteur commandé par un buck 4 quadrants

Les résultats de simulations sont donnés par la figure ci-dessous :

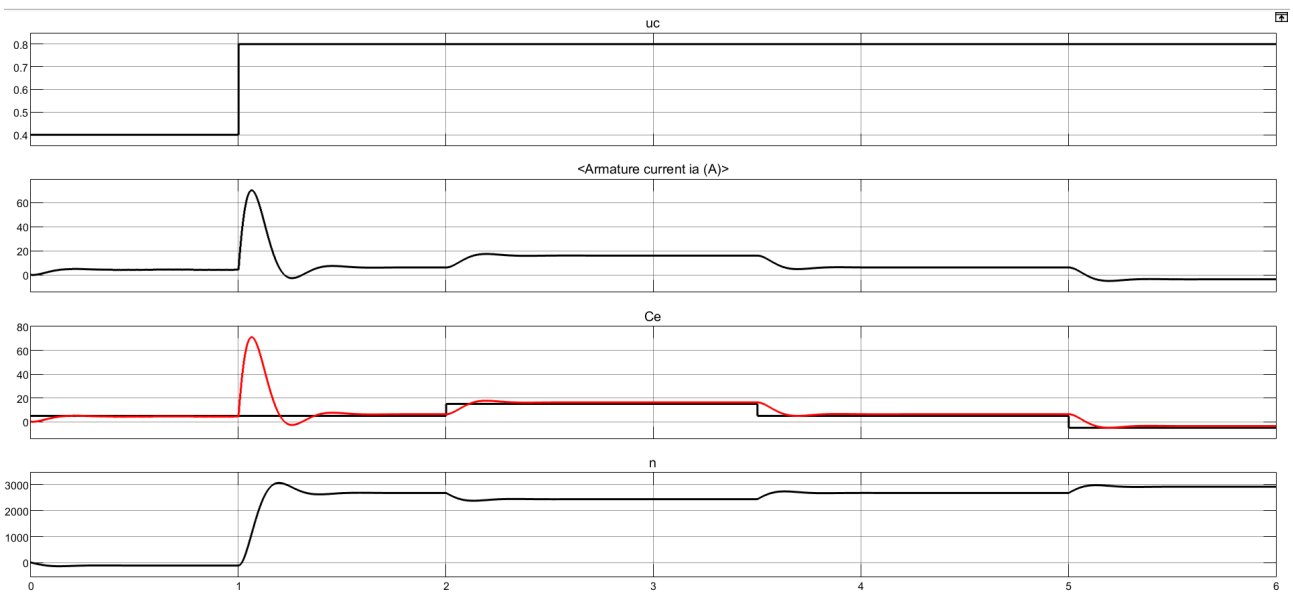


FIGURE 1.12 – Variation du courant, du couple et de la vitesse

Interpretation :

Suite à un changement de rapport cyclique allant de 0.4 à 0.8 à l'instant $t = 1\text{sec}$ on voit que la vitesse passe d'une valeur légèrement inférieure à 0 à une valeur positive égale à 2700tr.mn^{-1} .

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi la modélisation du convertisseur statique DC-DC (buck) et réalisé plusieurs simulations :

- Moteur-buck 1 quadrant.
- Moteur-buck 2 quadrants.
- Moteur-buck 4 quadrants.

Un choix adéquat du convertisseur permet un bon fonctionnement de la machine dans différents quadrants. En effet pour un convertisseur 4 quadrants la machine est réversible et peut tourner dans les deux sens de rotations.

Chapitre 2

Réglage cascade de vitesse et du couple

2.1 Introduction

Les processus présentant deux dynamiques lente et rapide doivent être commandés par un réglage en cascade, contenant un régulateur de la boucle interne (secondaire) et un régulateur de la boucle externe (principale). Dans notre cas il s'agit d'une machine à courant continu avec deux dynamiques :

$$\begin{cases} T_m = \frac{J}{f} \\ T_e = \frac{L}{R} \end{cases} \quad \text{avec } T_m \gg T_e \quad (2.1)$$

Ainsi les régulateurs proposés sont :

- Régulateur proportionnel P du couple (boucle interne).
- Régulateur de vitesse (boucle externe) selon deux stratégies :
 - Classique Proportionnel-Intégral PI
 - Régulateur flou Proportionnel-Dérivé PD et Proportionnel-Intégral-Dérivé PID

2.2 Théorie du réglage classique

Un régulateur PI (Proportionnel-Intégral) est un contrôleur utilisé dans les systèmes de contrôle automatique pour maintenir une variable de processus à une valeur cible. Il combine deux actions de contrôle : l'action proportionnelle (P) et l'action intégrale (I). Voici une brève description de chacune de ces actions :

2.2.1 Correcteur Proportionnel P [3]

C'est le correcteur de base, il agit principalement sur le gain du système asservi, il permet l'amélioration et la précision du système, la loi de commande corrigée $u(t)$ est proportionnelle à l'écart $\epsilon(t)$:

$$u(t) = k_p \cdot \epsilon(t) \quad (2.2)$$

D'après la loi de la place :

$$U(s) = k_p \cdot \epsilon(s) \quad (2.3)$$

Ce qui implique :

$$C(s) = \frac{U(s)}{\epsilon(s)} = k_p \quad (2.4)$$

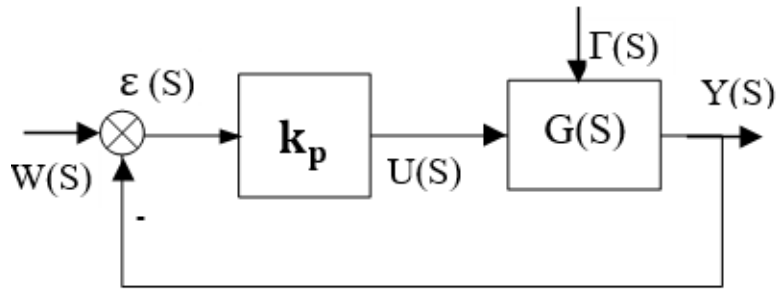


FIGURE 2.1 – Schéma de régulateur proportionnel

2.2.2 Correcteur intégral I [3]

Les contrôleurs intégrals, sont des éléments clés dans la conception des systèmes de contrôle automatique. Leur fonction principale est de générer une action de commande qui intègre l'erreur entre la sortie désirée et la sortie réelle du système

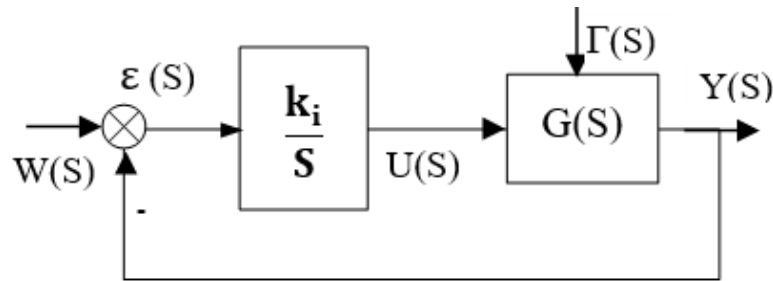


FIGURE 2.2 – Schéma de régulateur intégral

La loi de commande $u(t)$ d'un intégrateur est de la forme :

$$u(t) = k_i \int \epsilon(u) du \quad (2.5)$$

D'après la loi de la place :

$$U(s) = k_i \cdot \frac{\epsilon(s)}{s} \quad (2.6)$$

Ce qui implique :

$$C(s) = \frac{U(s)}{\epsilon(s)} = \frac{k_i}{s} = \frac{1}{T_i \cdot s} \quad (2.7)$$

- Donc la loi de commande d'un correcteur proportionnelle-intégral PI :

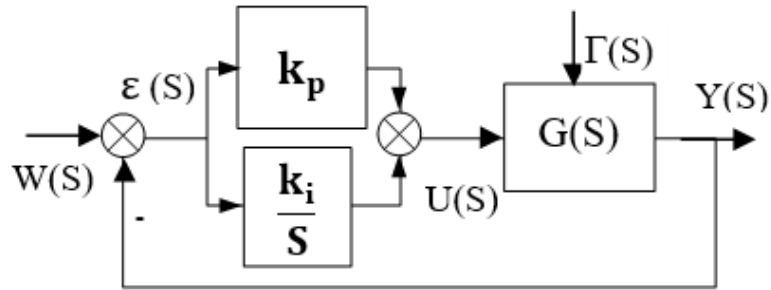


FIGURE 2.3 – Schéma du régulateur proportionnel-intégral parallèle

$$u(t) = k_p \cdot \epsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int \epsilon(t), dt \quad (2.8)$$

D'après la loi de la place :

$$U(s) = k_p \left(\epsilon(s) + \frac{1}{T_i} \cdot \frac{\epsilon(s)}{s} \right) \quad (2.9)$$

Ce qui implique :

$$U(s) = k_p \left(\epsilon(s) \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \right) \quad (2.10)$$

$$U(s) = k_p \epsilon(s) \left(\frac{1 + T_i \cdot s}{T_i \cdot s} \right) \quad (2.11)$$

$$C(s) = \frac{Y(s)}{\epsilon(s)} = k_p \left(\frac{1 + T_i \cdot s}{T_i \cdot s} \right) \quad (2.12)$$

2.3 Réglage du couple

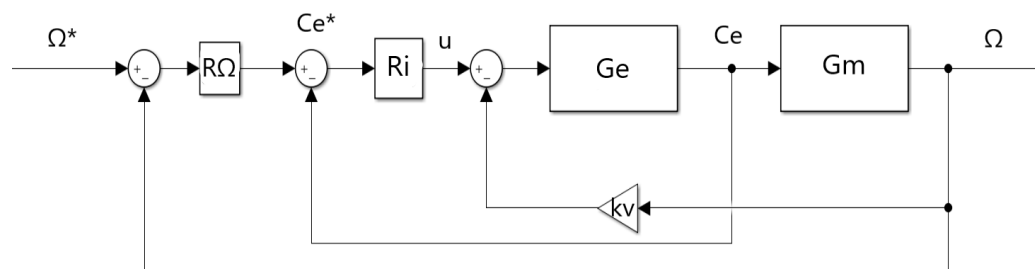


FIGURE 2.4 – Schéma du MCC avec réglage de couple et vitesse

La fonction de transfert du processus couple :

— En boucle ouverte :

$$G_i = \frac{C_e}{u} = \frac{G_e}{1 + K_v \cdot G_e \cdot G_m} \quad (2.13)$$

avec :

$$\begin{cases} G_e = \frac{K_c}{R} \cdot \frac{1}{1 + T_e \cdot s} \\ G_m = \frac{1}{f} \cdot \frac{1}{1 + T_m \cdot s} \end{cases} \quad (2.14)$$

On en déduit que :

$$G_i(s) = \frac{A(1 + T_m)}{1 + s \left(\frac{(T_e + T_m)(R \cdot f)}{K_c \cdot K_v} \right) + s^2 \left(\frac{(T_e \cdot T_m)(R \cdot f)}{K_c \cdot K_v} \right)} \quad (2.15)$$

Avec :

$$A = \frac{K_c \cdot f}{R \cdot f} + K_c \cdot K_v$$

— En boucle ouverte (Le réglage Proportionnel)

$$F_i(s) = \frac{T_i(s)}{1 + T_i(s)} = \frac{K_{pi} \cdot G_i(s)}{1 + K_{pi} \cdot G_i(s)} \quad (2.16)$$

$$F_i(s) = \frac{\frac{K_{pi} \cdot A(1 + T_m \cdot s)}{1 + K_{pi} \cdot A}}{1 + s \left(A \cdot K_{pi} \left(T_m + \frac{T_e + T_m}{K_c \cdot K_v} \cdot R \cdot f \right) \cdot \frac{1}{1 + K_{pi} \cdot A} \right) + s^2 \left(\frac{T_e \cdot T_m}{K_c \cdot K_v} \cdot R \cdot f \cdot \frac{1}{1 + K_{pi} \cdot A} \right)} \quad (2.17)$$

Le polynôme caractéristique :

$$D(s) = 1 + s \cdot \frac{2 \cdot \xi}{\omega_n} + s^2 \cdot \frac{1}{\omega_n^2} \quad (2.18)$$

Par identification avec le polynôme caractéristique on trouve :

$$\begin{cases} \frac{2 \cdot \xi}{\omega_n} = A \cdot K_{pi} \left(T_m + \frac{T_e + T_m}{K_c \cdot K_v} \cdot R \cdot f \right) \cdot \frac{1}{1 + K_{pi} \cdot A} \\ \frac{1}{\omega_n^2} = \frac{T_e \cdot T_m}{K_c \cdot K_v} \cdot R \cdot f \cdot \frac{1}{1 + K_{pi} \cdot A} \end{cases} \quad (2.19)$$

Avec les paramètres suivants :

$$\begin{cases} \xi = \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \omega_n = 0.574 \text{ rad.sec}^{-1} \end{cases} \quad (2.20)$$

On déduit que :

$$K_{pi} = 2 \quad (2.21)$$

2.4 Réglage de vitesse

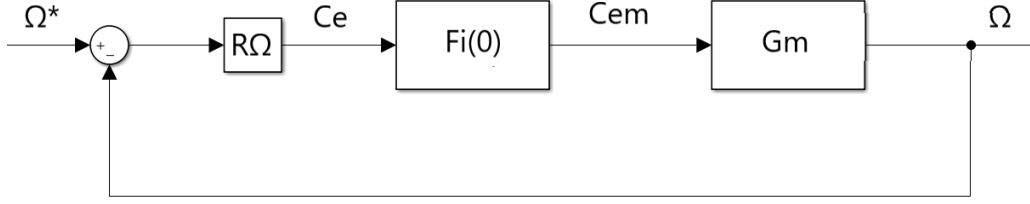


FIGURE 2.5 – Schéma du MCC avec réglage de vitesse

La fonction de transfert du processus vitesse :

$$F_i(0) = \frac{K_{pi}A}{1 + K_{pi}A} \quad (2.22)$$

$$G_{\Omega}(s) = \frac{K_{pi}A}{1 + K_{pi}A} \frac{\frac{1}{f} \cdot \frac{\pi}{30}}{1 + T_m \cdot s} \quad (2.23)$$

on a :

$$T_{\Omega}(s) = \left(\frac{k_p \Omega + k_i \Omega}{s} \right) G_{\Omega}(s) \quad (2.24)$$

$$F_{\Omega}(s) = \frac{T_{\Omega}(s)}{1 + T_{\Omega}(s)} \quad (2.25)$$

on déduit :

$$F_{\Omega}(s) = \frac{\left(\frac{\pi}{30f} \right) F_i(0) \cdot K_i \left(1 + \frac{K_p}{K_i} \cdot s \right)}{1 + \left(\frac{30f}{K_i \cdot \pi \cdot F_i(0)} + \frac{K_p}{K_i} \right) s + \frac{30T_m}{K_i \cdot \pi \cdot F_i(0)} s^2} \quad (2.26)$$

Par identification avec le polynôme caractéristique (2.18) :

$$\begin{cases} \omega_n^2 = \frac{K_i \Omega \cdot \pi \cdot F_i(0)}{30 \cdot f \cdot T_m} \\ \frac{2 \cdot \xi}{\omega_n} = \frac{30 \cdot f}{K_i \Omega \cdot \pi \cdot F_i(0)} + \frac{K_p \Omega}{K_i \Omega} \end{cases} \quad (2.27)$$

On trouve :

$$\begin{cases} K_i \Omega = 0.2 \\ K_p \Omega = 10^{-2} \end{cases} \quad (2.28)$$

2.5 Moteur-Hacheur avec regulateur classique PI

Les figure ci-dessous donnent le schéma simulink d'un moteur commandé par un buck avec régulation PI dans les quatre quadrants :

— Moteur-hacheur 1 quadrant :

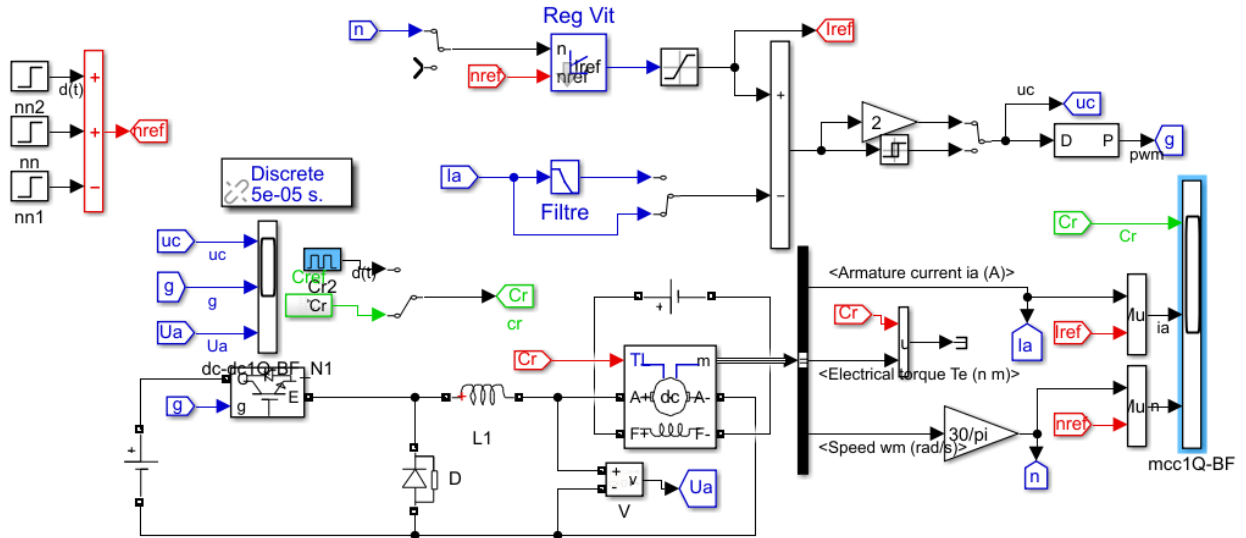


FIGURE 2.6 – Moteur-Hacheur 1 quadrant avec régulation classique

Les résultats de simulations sont donnés par la figure ci-dessous :

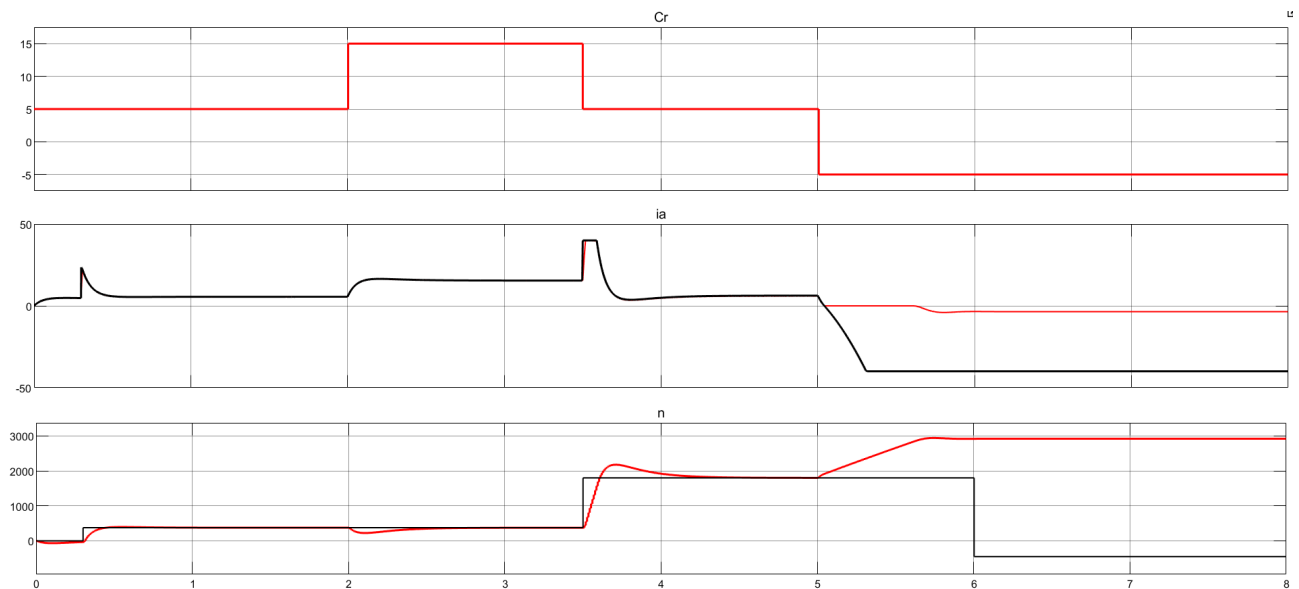


FIGURE 2.7 – Variation du couple résistant et de la vitesse

— Moteur-hacheur 4 quadrants :

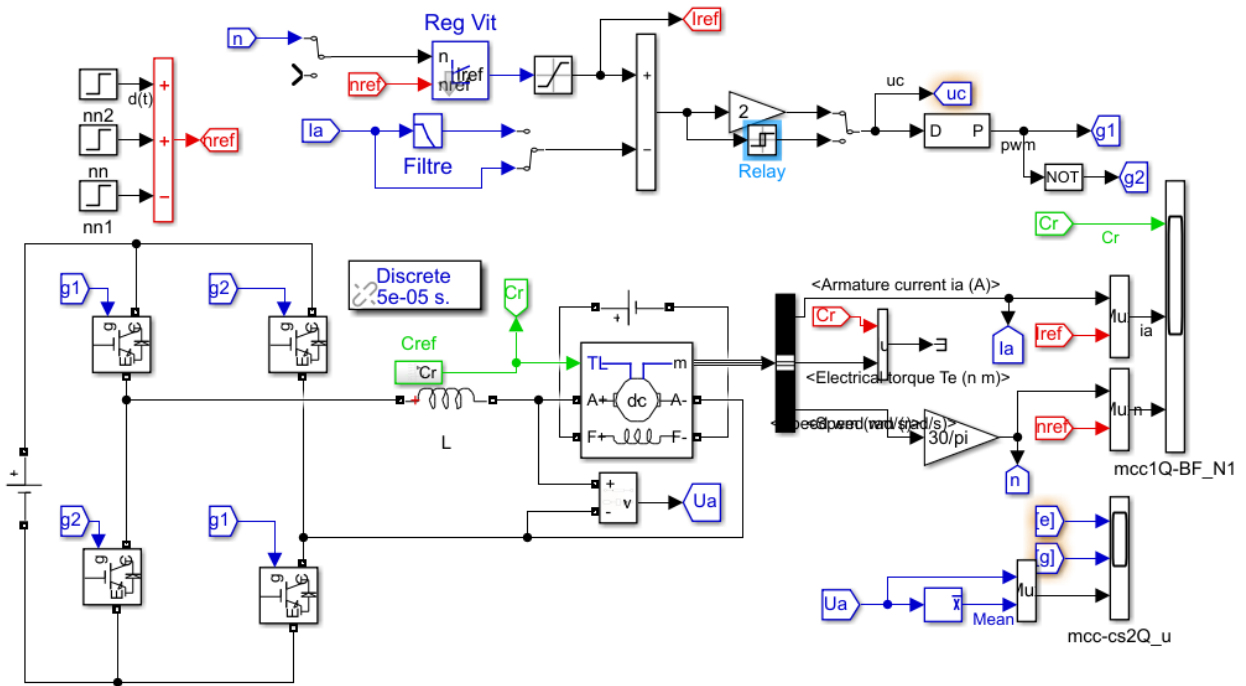


FIGURE 2.10 – Moteur-Hacheur 4 quadrants avec regulation classique

Les résultats de simulations sont donnés par la figure ci-dessous :

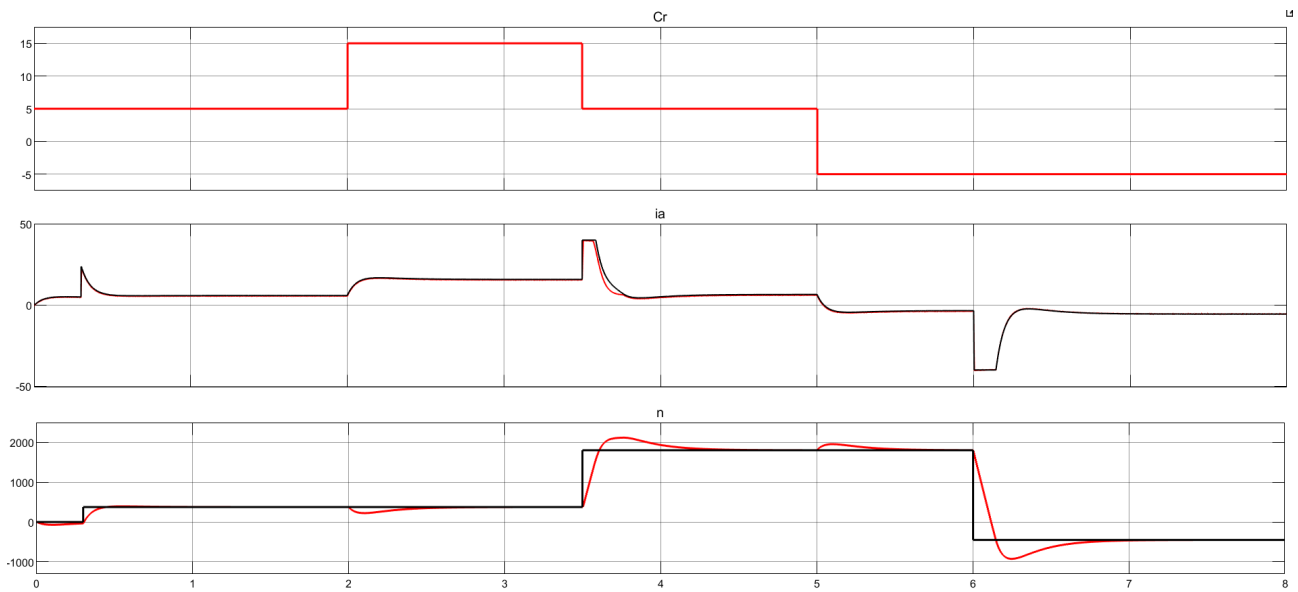


FIGURE 2.11 – Variation du couple résistant et de la vitesse

2.5.1 Interpretation

— $0 < t < 2$ et $2 < t < 3,5$ et $3,5 < t < 5$:

- fonctionnement moteur : lorsque $C_e > 0$ et $n > 0 \Rightarrow P_m = C_e * n > 0$

Les performances sont identiques quel que soit le type de hacheur (1 Quadrant, 2 Quadrants, 4 Quadrants).

— $5 < t < 6$:

- fonctionnement générateur : $C_e < 0$ et $n > 0 \Rightarrow P_m = C_e * n < 0$

• hacheur 1 quadrant : Il n'y a pas de suivi du courant ni de la vitesse, ce qui signifie qu'il est impossible de réguler le courant (I) et la vitesse (n).

• hacheur 2 quadrants : Il y a un suivi du courant et de la vitesse, ce qui permet de régler le courant (I) et la vitesse (n).

• hacheur 4 quadrants : "Il y a un suivi du courant et de la vitesse, ce qui permet de régler I et n.

— $6 < t < 8$:

- fonctionnement moteur : $C_e < 0$ et $n < 0 \Rightarrow P_m = C_e * n > 0$

• hacheur 1 quadrant : Il n'y a pas de suivi du courant ni de la vitesse, ce qui signifie qu'il est impossible de réguler le courant (I) et la vitesse (n).

• hacheur 2 quadrants : Il n'y a pas de suivi du courant ni de la vitesse, ce qui signifie qu'il est impossible de réguler le courant (I) et la vitesse (n).

• hacheur 4 quadrants : Il y a un suivi du courant et de la vitesse, ce qui permet de régler le courant (I) et la vitesse (n).

2.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, on observe que la régulation PI de la machine à courant continu est une solution offrant de bonnes performances en termes de stabilité, de précision et de temps de réponse. Le moteur à courant continu, facile à modéliser et offre de bonnes performances dans le domaine des entraînements.

Les quatre quadrants de fonctionnement de la machine ont été testés en boucle fermée. On remarque que plus les régimes de fonctionnement varient, plus il est nécessaire d'utiliser des convertisseurs adaptés à chaque état de fonctionnement. Le passage du mode moteur au mode générateur avec deux sens de rotation nécessite l'utilisation d'un hacheur à quatre quadrants.

Chapitre 3

Régulateur flou de vitesse

3.1 Introduction

En 1965, Lotfi Zadeh de l'université de Californie à Berkeley a publié un article intitulé "Les ensembles flous", marquant ainsi l'apparition de la logique floue. Cette logique est une extension de la logique classique (booléenne), permettant de modéliser les imperfections des données en tenant compte de l'inexactitude et de l'incertitude, se rapprochant ainsi de la flexibilité du raisonnement humain. [7]

La logique floue a eu un impact significatif sur plusieurs domaines des sciences appliquées, tels que la physique, l'électronique et l'économie. De nombreuses applications ont été développées dans des contextes où les modèles déterministes étaient inexistantes et où l'imprécision des données rendait les méthodes classiques inopérantes. [7] Dans ce chapitre, nous explorerons le raisonnement basé sur la théorie de la logique floue, en présentant ses notions fondamentales ainsi que la structure d'un contrôleur basé sur cette logique.

3.2 Définition

La logique floue est fondée sur un degré de vérité représenté par un nombre réel entre 0 et 1, ce qui la distingue de la logique booléenne classique, qui se limite à deux valeurs, 0 et 1. Cette méthode est appliquée dans divers domaines, tels que l'automatique, la robotique et la médecine. Elle repose sur la théorie des ensembles flous, qui est une extension de la théorie classique et permet de traiter des ensembles imprécisément définis. [10] Introduite par Lotfi Zadeh, la logique floue utilise le concept de fonction d'appartenance pour modéliser les sous-ensembles d'un univers donné. C'est une théorie mathématique formalisée qui offre un modèle complet pour la définition et la formalisation des propriétés. Zadeh a également montré que cette théorie des sous-ensembles flous se réduit à la théorie classique des sous-ensembles lorsque les fonctions d'appartenance prennent des valeurs binaires (0 ou 1). [10]

3.3 Exemple introductif

Pour illustrer les principes fondamentaux de la logique floue, prenons un exemple simple qui divise la température d'un liquide en trois catégories : « Chaude, Tiède et Froide ». Dans la logique booléenne, la classification des variables n'accepte que les valeurs 0 et 1, et se fait de la manière suivante :

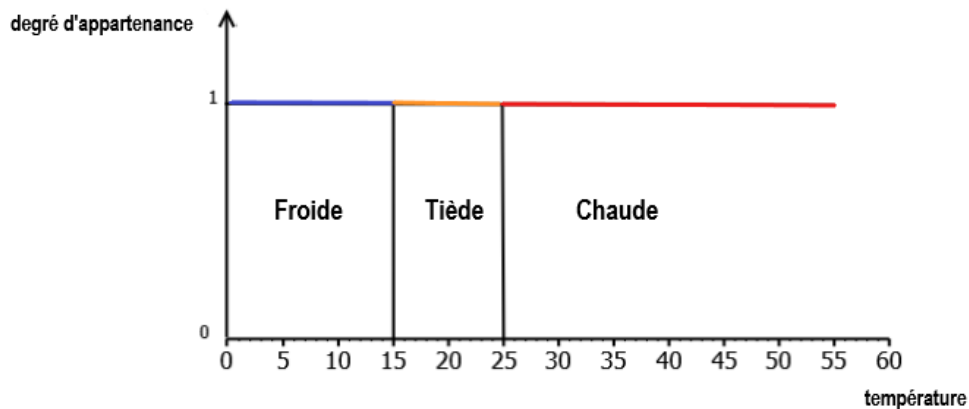


FIGURE 3.1 – Classification selon la logique booléenne

Toute température inférieure à 15°C est considérée comme froide, celle entre 15°C et 25°C comme tiède, et celle supérieure à 25°C comme chaude. Cependant, une telle logique de classification est irréaliste, car la transition entre les catégories froide et chaude devrait se faire de manière progressive. En logique floue, les variables sont autorisées à adopter des valeurs continues sur une plage de 0 à 1, ce qui évite des transitions abruptes et favorise une évolution progressive.

Prenons à nouveau l'exemple précédent, mais cette fois en appliquant la logique floue : à une température de 12°C, on associe un degré d'appartenance de 0.7 à l'ensemble "froid" et de 0.3 à l'ensemble "tiède". En revanche, à 50°C, la température est pleinement associée à l'ensemble "chaud" avec un degré d'appartenance de 1. Cette illustration démontre la souplesse de la logique floue pour représenter des nuances dans l'appartenance à des ensembles, ce qui est reflété dans le diagramme fourni.

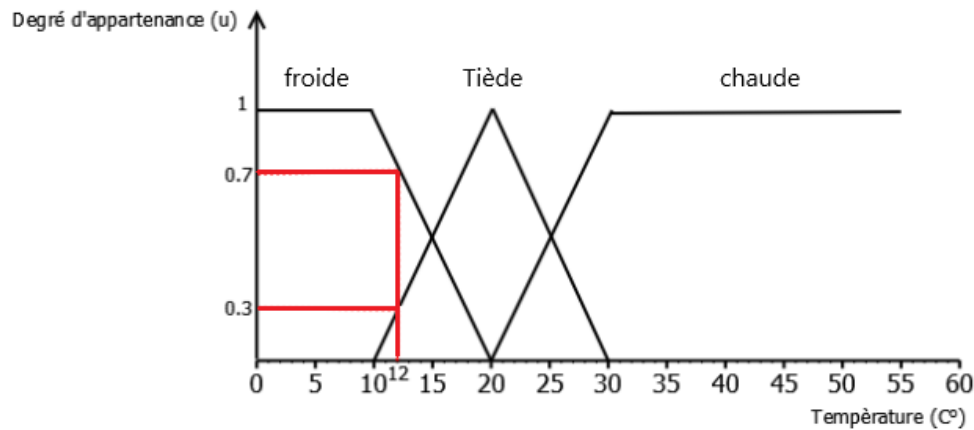


FIGURE 3.2 – Classification selon la logique floue

3.4 Les concepts de bases

3.4.1 l'ensemble floue

La logique floue utilise des ensembles flous caractérisés par une fonction d'appartenance, symbolisée par μ_F , qui peut varier sur une échelle continue de 0 à 1. Cette fonction est essentielle pour éviter les changements brusques d'une catégorie à une autre, contrairement aux ensembles classiques qui se limitent à deux valeurs distinctes.

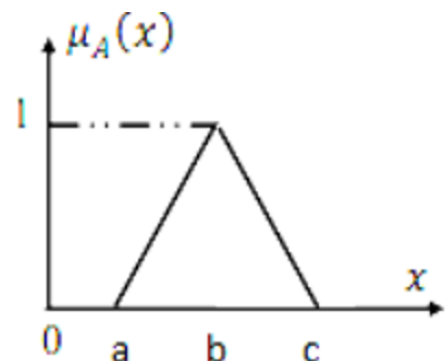
3.4.2 les fonctions d'appartenances [2]

Il s'agit d'établir une relation entre le degré de vérité de la variable floue et la grandeur d'entrée correspondante, les sous-ensembles flous sont ceux caractérisés par une fonction d'appartenance notée $\mu_A(x)$ définie sur $[0,1]$.

Les fonctions d'appartenance les plus couramment utilisées sont :

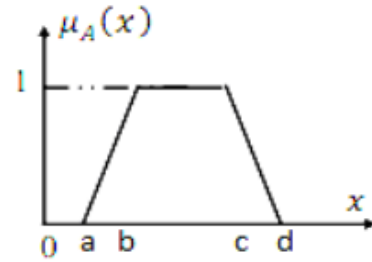
Fonction triangulaire :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{b-x}{c-x} & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases}$$



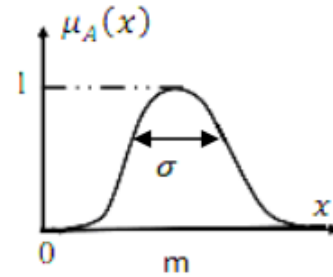
Fonction trapézoïdale :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{c-x}{c-b} & c \leq x \leq d \\ 0 & x > d \end{cases}$$



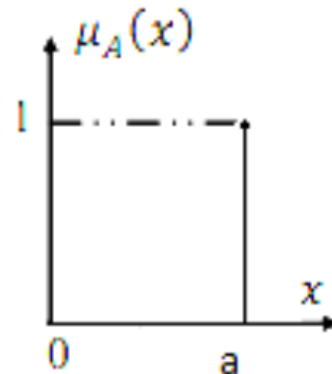
Fonction gaussien :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} A(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right) \end{cases}$$



Fonction singleton :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x = a \\ 0 & x \neq a \end{cases}$$



3.4.3 Les variables et les valeurs linguistiques

La logique floue se base sur l'utilisation de variables floues, appelées variables linguistiques, qui prennent des valeurs linguistiques dans un univers de discours donné, noté U. Une variable linguistique représente un état dans le système à régler ou une variable de réglage dans un contrôleur flou. Chaque valeur linguistique correspond à un ensemble flou dans l'univers de discours. Généralement, une variable linguistique est définie par :

Un nom qui lui est attribué. Un ensemble de valeurs linguistiques qu'elle peut prendre. L'univers de discours, c'est-à-dire l'ensemble des valeurs numériques sur lesquelles elle est définie [8]

3.4.4 Univers de discours

C'est un ensemble noté U, qui contient toutes les valeurs possibles de la variable linguistique. Pour illustrer cette notion, reprenons l'exemple précédent : un utilisateur peut décrire la variable "Température" avec plusieurs termes, tels que "Froide", "Tiède" et "Chaude". Pour chacun de ces termes, on peut définir une fonction d'appartenance, et le domaine de discours inclut toutes les valeurs que la variable peut prendre.[5]

3.5 Opérateurs de la logique floue [3]

Soit deux ensembles flous A et B définis sur les univers de discours V et W, avec une fonction d'appartenance respective μ_A et μ_B .

3.5.1 Conjonction floue (Opérateur ET)

La fonction d'appartenance $\mu_{A \cap B}$ pour l'ensemble flou $A \cap B$ est définie comme suit :

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\}$$

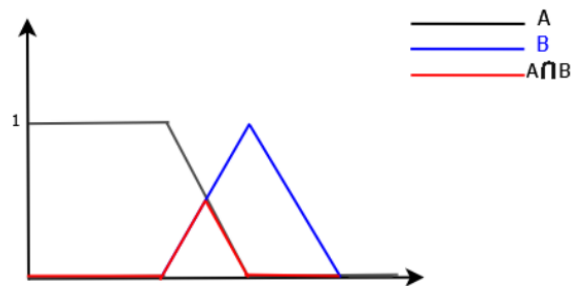


FIGURE 3.3 – Operateur ET

3.5.2 Disjonction floue (Opérateur OU)

La fonction d'appartenance $\mu_{A \cup B}$ pour l'ensemble flou $A \cup B$ est définie comme suit :

$$\mu_{A \cup B}(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\}$$

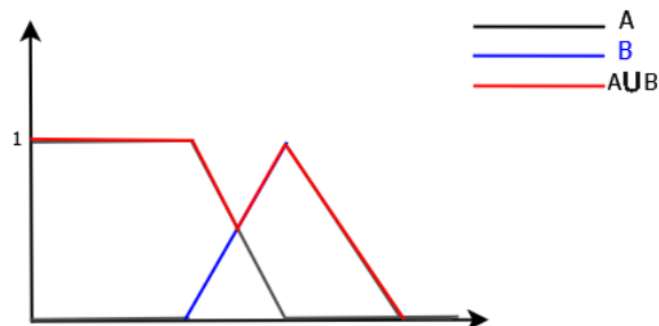


FIGURE 3.4 – Operateur OU

3.5.3 Complément (Opérateur NON)

: La fonction d'appartenance $\mu_{\bar{A}}$ pour l'ensemble flou \bar{A} par :

$$\mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u)$$

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A \quad (3.1)$$

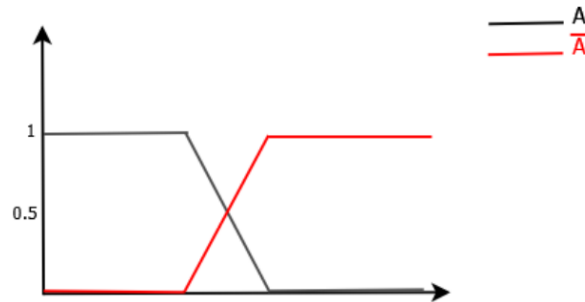


FIGURE 3.5 – Operateur NON

3.6 Principe d'un Contrôleur Flou

La conception d'un contrôleur classique, comme un contrôleur PI, nécessite une connaissance précise du modèle du système à contrôler et des mesures exactes des valeurs d'entrée pour éviter les erreurs. En revanche, un contrôleur flou ne requiert pas ces spécifications. Il ne nécessite pas la connaissance du modèle mathématique du processus, mais s'appuie sur l'expérience des opérateurs et les connaissances des experts pour établir la commande floue. Les algorithmes de réglage traditionnels sont remplacés par des règles linguistiques. La commande par logique floue peut s'appliquer à tous les domaines de la commande traditionnelle, et elle est particulièrement utile lorsque les processus sont mal connus ou difficiles à décrire précisément, ou lorsque les variables sont évaluées subjectivement et exprimées en langage naturel plutôt qu'en termes numériques. Cette méthode est simple à réaliser, flexible et facilement adaptable aux conditions de fonctionnement du processus. Les règles, exprimées en langage naturel, sont faciles à comprendre et à modifier.[9]

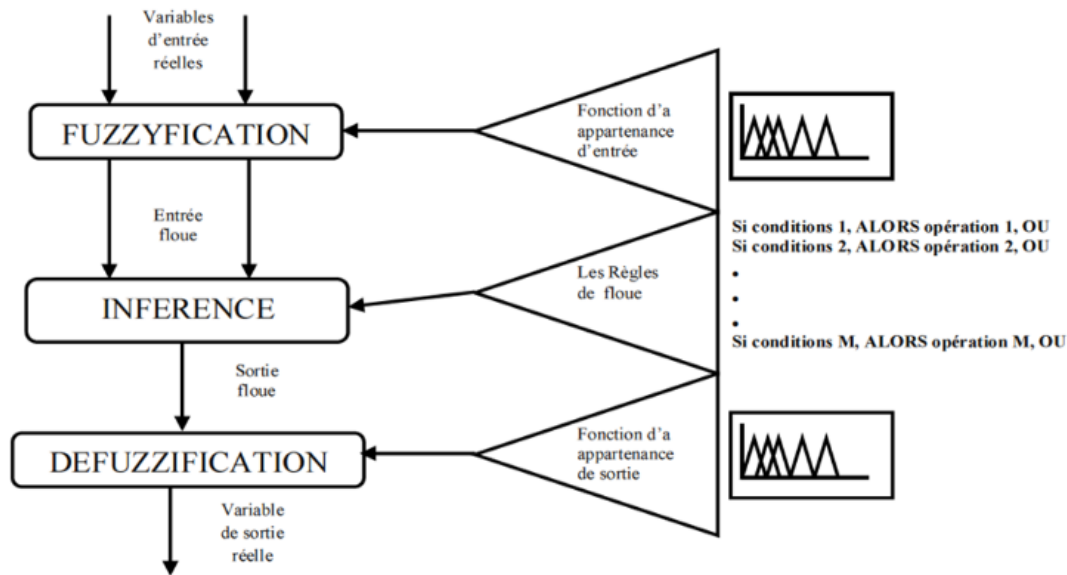


FIGURE 3.6 – Les opérations du contrôleur flou [10]

Le régulateur flou se structure en trois étapes : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification.

3.6.1 Fuzzification

Elle décrit la transition des grandeurs réelles vers des valeurs floues en identifiant les différents univers de discours des variables d'entrée et de sortie. Par la suite, pour chaque variable, elle établit des ensembles flous et leurs fonctions d'appartenance respectives [4]

3.6.2 Bloc d'inférence

Dans ce bloc, les valeurs des variables linguistiques d'entrée et de sortie sont interconnectées à travers une table de règles. Cette table doit prendre en considération le comportement statique et dynamique du système à contrôler. Il s'agit d'un mécanisme de prise de décision qui, en manipulant les règles floues, aboutit à une décision. [4]

3.6.3 Défuzzification

Il s'agit de déterminer avec précision quelle action doit être réalisée sur le processus. En effet, le procédé ne peut pas directement comprendre les ordres linguistiques fournis par les méthodes d'inférence. La défuzzification permet alors de calculer la valeur réelle de la variable de sortie à appliquer au processus à partir de la fonction d'appartenance résultante. Plusieurs méthodes de défuzzification existent, telles que la méthode du maxima, la méthode du centre de gravité et la méthode de la moyenne des maxima. Cependant, il est généralement reconnu que la méthode du centre de gravité donne les meilleurs résultats.

Il est à noter que des blocs de normalisation et de dénormalisation sont ajoutés respectivement en entrée et en sortie du contrôleur flou pour assurer sa portabilité et son adaptation, même avec des paramètres différents.[4]

3.7 Synthèse de la matrice des règles floues

D'après la figure ci-dessous, le régulateur flou de vitesse a deux entrées : l'une est l'erreur de commande, qui correspond à la différence entre la consigne et la sortie, et l'autre est la variation de cette erreur, c'est-à-dire :

$$\begin{cases} e = n^* - n \\ ce = \frac{de}{dt} \end{cases} \quad (3.2)$$

Ces entrées sont d'abord converties en valeurs d'appartenance floues grâce à un processus de fuzzification, qui sont ensuite utilisées dans une base de règles, également connue sous le nom de table de décision floue, pour générer une commande floue définie sur l'univers de $u(t)$. Ensuite, le système en boucle fermée est considéré avec une erreur de commande correspondant à une réponse indicielle du second ordre (voir figure 2.12). Ce signal d'erreur peut être soit apériodique (exponentielle décroissante), soit oscillatoire amorti (avec une composante exponentielle décroissante). Cette dernière forme est utilisée pour construire la table de règles, car elle inclut les effets de dépassement, permettant ainsi à la base de règles de couvrir des cas plus généralisés.

Nous subdivisons la réponse oscillatoire en 10 zones, tel qu'indiqué dans la figure (2.12). Pour chacune de ces zones, nous calculons la commande requise pour assurer une réponse oscillatoire amortie avec une erreur statique nulle.

En d'autres termes, quelles mesures doivent être prises dans chaque zone pour obtenir cette réponse ? Doit-on augmenter ou diminuer la commande en fonction des valeurs de l'erreur e et de sa dérivée dans chaque zone ?

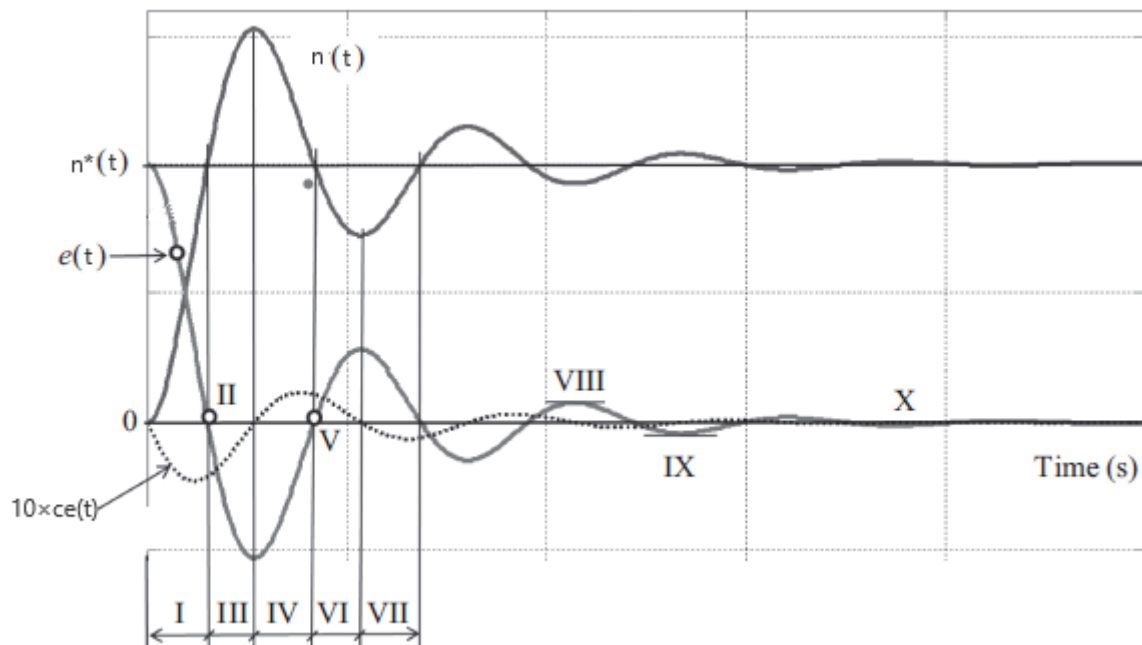


FIGURE 3.7 – Zones de fonctionnement de l'erreur et variation de l'erreur

Maintenant, examinons attentivement chaque zone et identifions ce qu'un opérateur devrait faire pour atteindre une erreur nulle en régime permanent.

- Région I : $e(t) > 0$ (erreur positive) et $ce(t) < 0$ (changement d'erreur négatif). Augmenter $u(t)$ pour accélérer la convergence vers zéro.
- Région II : $e(t) = 0$ et $ce(t) < 0$. Maintenir $u(t)$ élevé pour éviter une dérive positive de l'erreur.
- Région III : $e(t) < 0$ et $ce(t) < 0$. Réduire $u(t)$ pour limiter le dépassement.
- Région IV : $e(t) < 0$ et $ce(t) > 0$. Réduire $u(t)$ pour réduire le dépassement.
- Région V : $e(t) = 0$ et $ce(t) > 0$. Augmenter $u(t)$ pour éviter une dérive positive de l'erreur.
- Région VI : $e(t) > 0$ et $ce(t) > 0$. Augmenter $u(t)$ pour réduire l'erreur.
- Région VII : Répétition de la région I avec des amplitudes plus faibles.
- Région VIII : $e(t) > 0$ et $ce(t) = 0$. Augmenter $u(t)$ car la sortie est inférieure à la référence.
- Région IX : $e(t) < 0$ et $ce(t) = 0$. Réduire $u(t)$ car la sortie est supérieure à la référence.
- Région X : $e(t) = 0$ et $ce(t) = 0$. Pas de changement requis pour $u(t)$.

Les affectations de signe de $e(t)$ et $ce(t)$ sont résumées dans le tableau :

Régions opérationnelles										
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
$e(k)$	+	0	-	-	0	+	+	-	+	0
$de(k)$	-	-	-	+	+	+	-	0	0	0

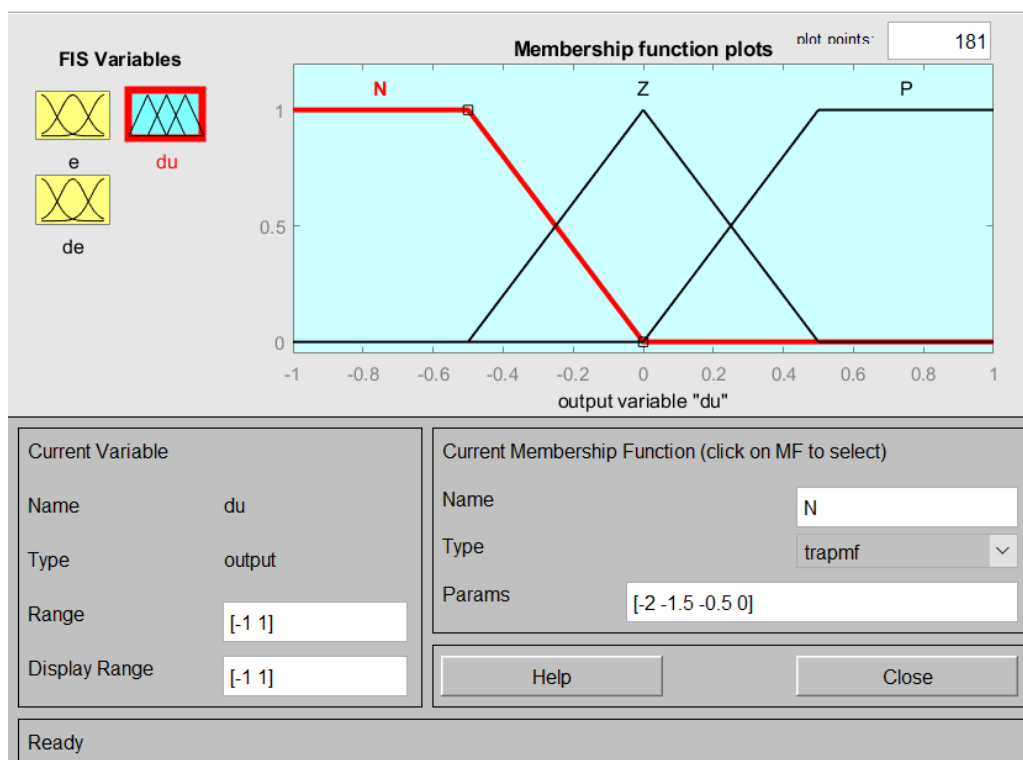
Dans notre simulation Simulink, nous avons mis en œuvre la technique de contrôle flou de type Mamdani. Cette méthode de contrôle flou utilise des règles linguistiques pour traduire les valeurs des variables d'entrée en une sortie floue, ce qui permet de modéliser des systèmes complexes avec une certaine tolérance aux imprécisions et aux variations. En utilisant l'approche de Mamdani, nous avons pu définir des règles de décision floues basées sur des connaissances linguistiques et les appliquer efficacement pour réguler le système étudié dans notre simulation. Par ailleurs trois types de matrices ont été utilisés :

1. Matrice 3x3

de/e	N	Z	P
N	N	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	P

TABLE 3.1 – Table de règle 3-3

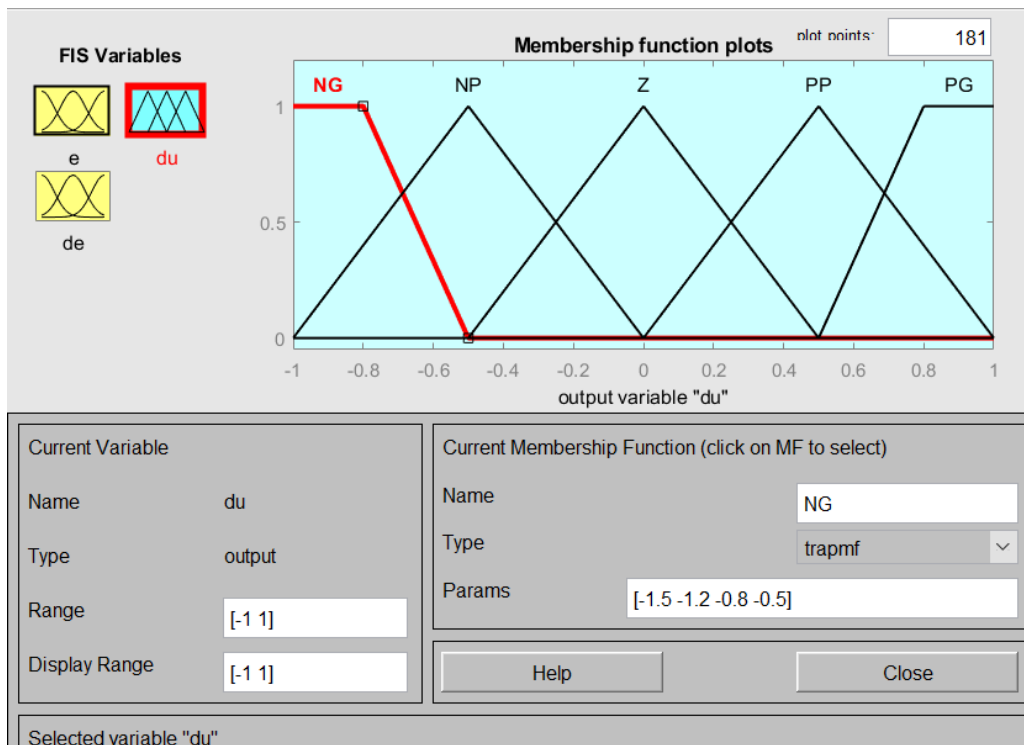
les fonctions d'appartenance correspondantes sont illustré par le schéma simulink de la figure suivante :



2. Matrice 5x5

de/e	NL	NS	Z	PS	PL
NL	NL	NL	NS	NS	Z
NS	NL	NS	NS	Z	PS
Z	NS	NS	Z	PS	PS
PS	NS	Z	PS	PS	PL
PL	Z	PS	PS	PL	PL

TABLE 3.2 – Table de règle 5-5



3. table de règle 7-7

de/e	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	Z
NM	NL	NL	NL	NM	NS	Z	PS
NS	NL	NL	NM	NS	Z	PS	PM
Z	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
PS	NM	NS	Z	PS	PM	PL	PL
PM	NS	Z	PS	PM	PL	PL	PL
PL	Z	PS	PM	PL	PL	PL	PL

TABLE 3.3 – Table de règle 7-7



3.8 Transfert des gains du PID classique vers le flou [6]

— Fonction de transfert d'un P :

$$C_p = K_p \quad (3.3)$$

Le schéma fonctionnel d'un correcteur P flou est donné par la figure ci-dessous :

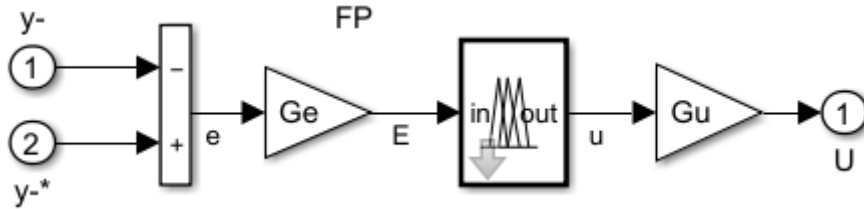


FIGURE 3.8 – Schéma simulink d'un P-flou

Les facteurs d'échelles sont liés par l'équation :

$$K_p = G_e \cdot G_u \quad \text{avec} \quad G_e \cdot \max|e| \leq 100 \quad (3.4)$$

— Fonction de transfert d'un PD :

$$C_{PD} = K_p(1 + T_d s) \quad (3.5)$$

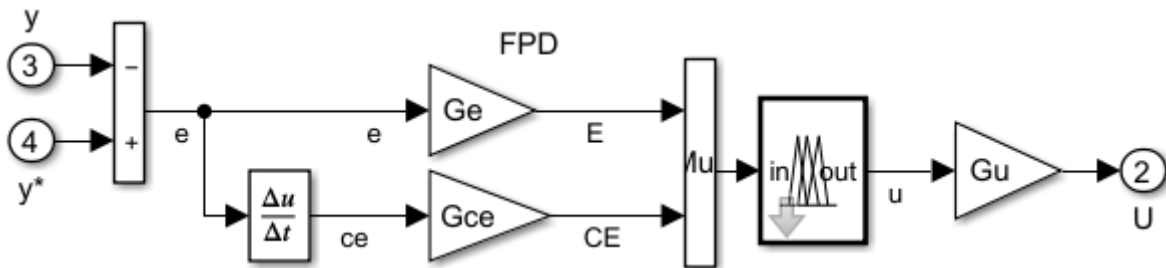


FIGURE 3.9 – Schéma simulink d'un PD flou

$$\begin{cases} K_p = G_e \cdot G_u \\ K_p \cdot T_d = G_{ce} \cdot G_u \end{cases} \quad (3.6)$$

avec :

$$\begin{cases} G_e \cdot \max|e| \leq 100 \\ G_{ce} \cdot \max|ce| \leq 100 \end{cases} \quad (3.7)$$

— Fonction de transfert d'un PI flou

$$C_{PI} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \quad (3.8)$$

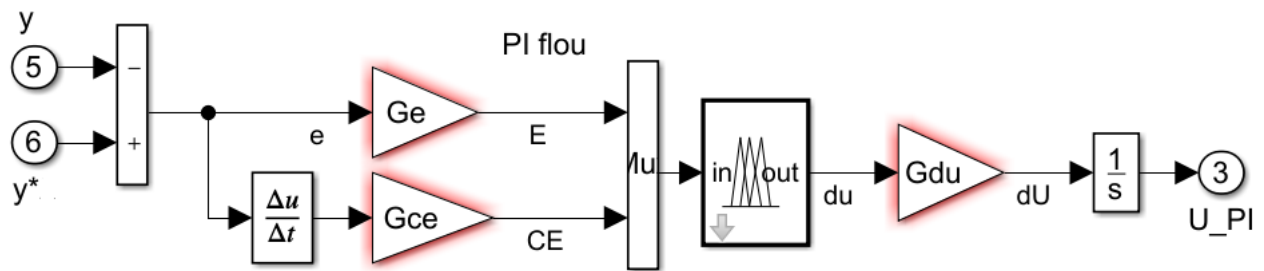


FIGURE 3.10 – Schéma simulink d'un PI flou

$$\begin{cases} K_p = G_{ce} \cdot G_{cu} \\ \frac{k_p}{T_i} = G_e \cdot G_{cu} \end{cases} \quad (3.9)$$

avec :

$$\begin{cases} G_{ce} \cdot \max|e| \leq 100 \\ G_{ce} \cdot \max|ce| \leq 100 \end{cases} \quad (3.10)$$

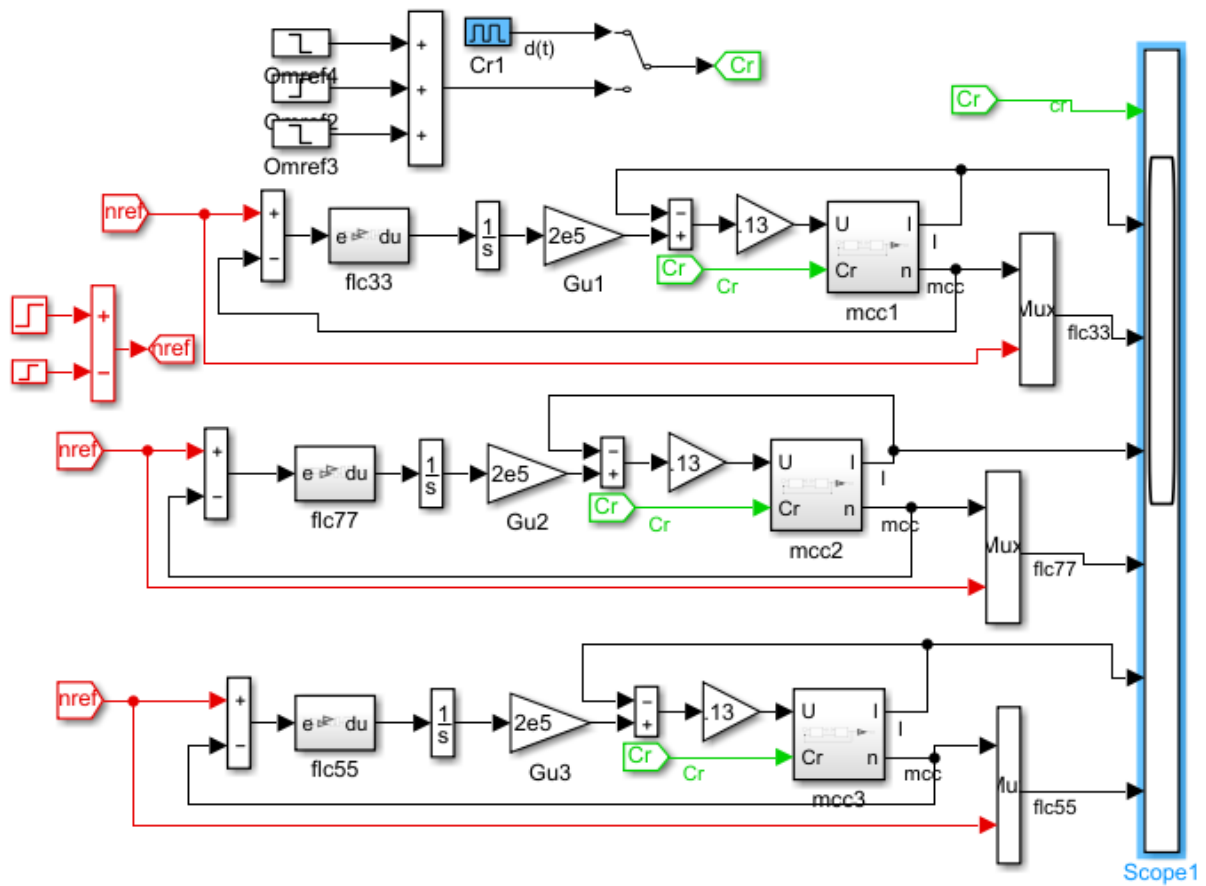


FIGURE 3.11 – Schéma simulink de différentes tables de règles de flu

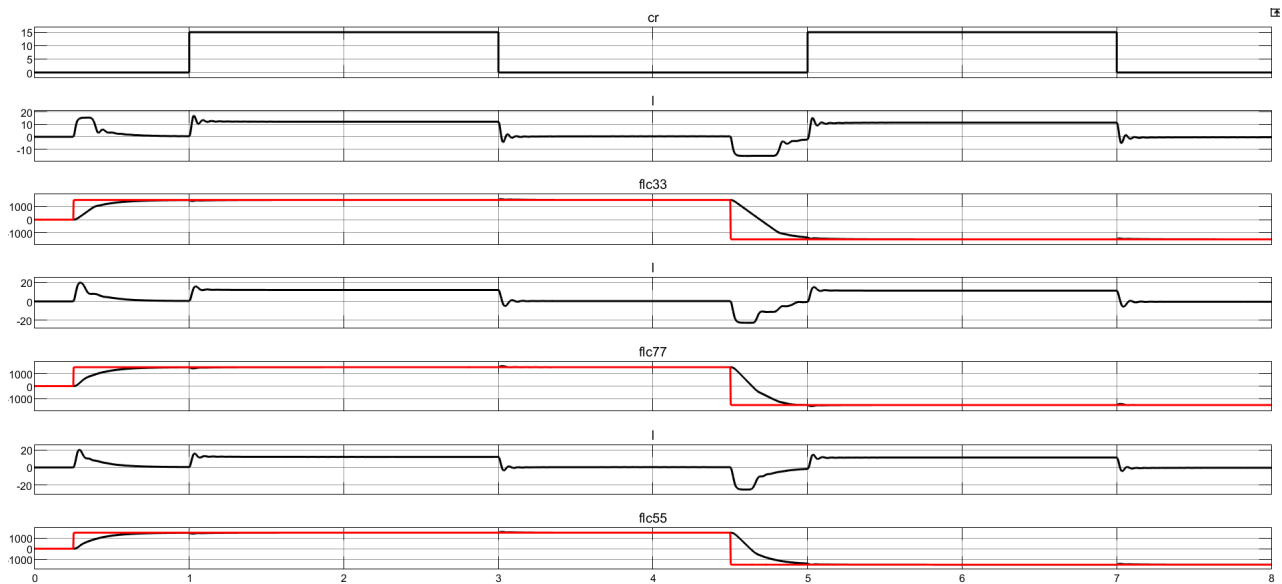


FIGURE 3.12 – Variaton du couple résistant pour les 3 tables de règle

Interprétation Valeur du couple resistant C_r :

- Matrice 3x3 : $n_{\min} = 1420 \text{ tr.min}^{-1}$
- Matrice 5x5 : $n_{\min} = 1412 \text{ tr.min}^{-1}$
- Matrice 7x7 : $n_{\min} = 1400 \text{ tr.min}^{-1}$

On observe une amélioration de performances dans le cas d'un régulateur fic 7x7

3.9 modification de la structure de regulateur flou

Dans la littérature il existe plusieurs structure P-flou,PD-flou,flou incrémental PI-flou PID ... Dans notre projet nous avons simuler le controle de vitesse avec un régultaur flou incrémental et un PI-flou

régulateur	k_p	$\frac{1}{T_i}$	T_d
FP	$G_e G_u$		
FInc	$G_{ce} G_{cu}$	$\frac{G_{ce}}{G_e}$	
FPD	$G_e G_u$		$\frac{G_e}{G_{ce}}$
FPD+I	$G_e G_u$	$\frac{G_{ie}}{G_e}$	$\frac{G_{ce}}{G_e}$

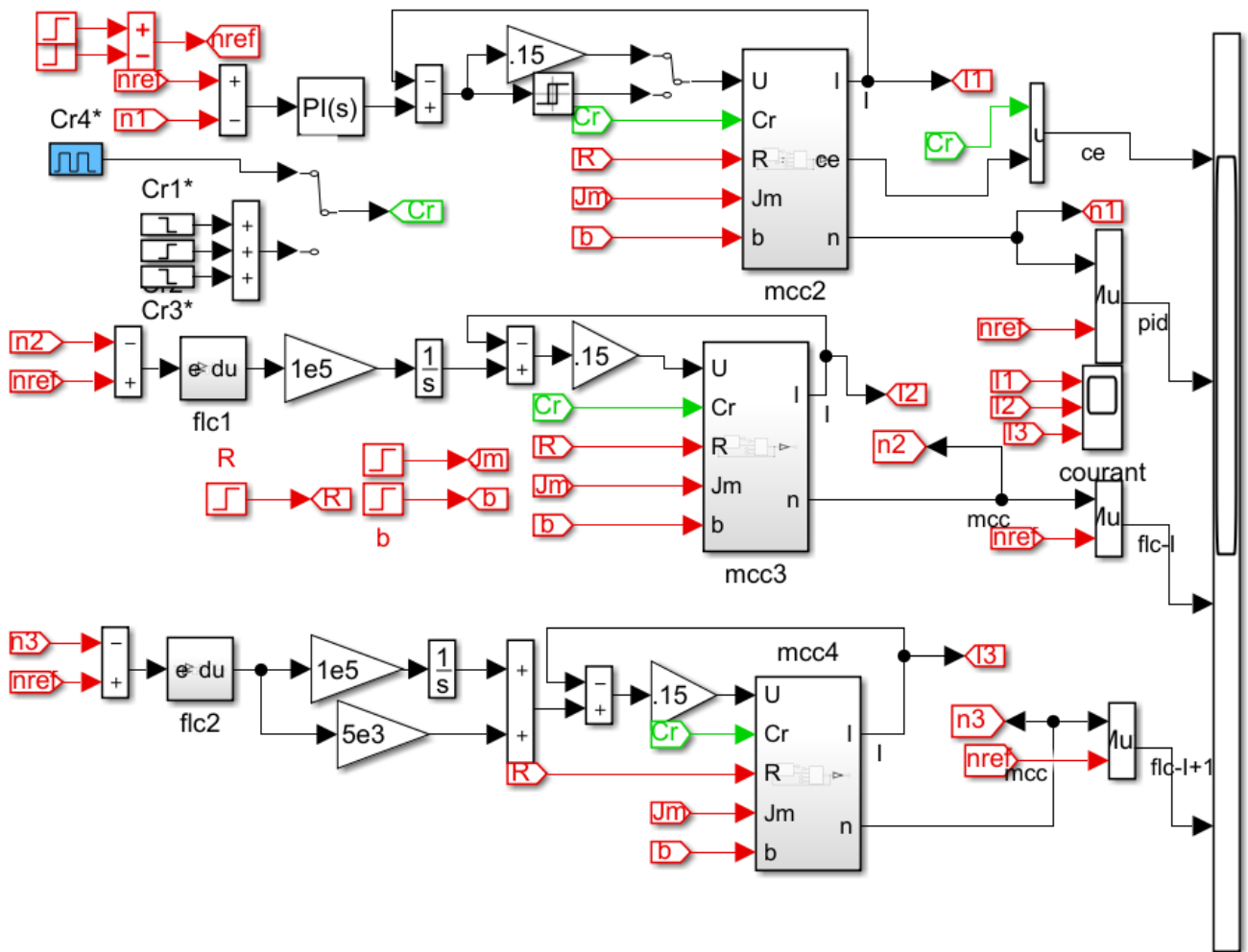


FIGURE 3.13 – Schéma simulink des différents régulateurs

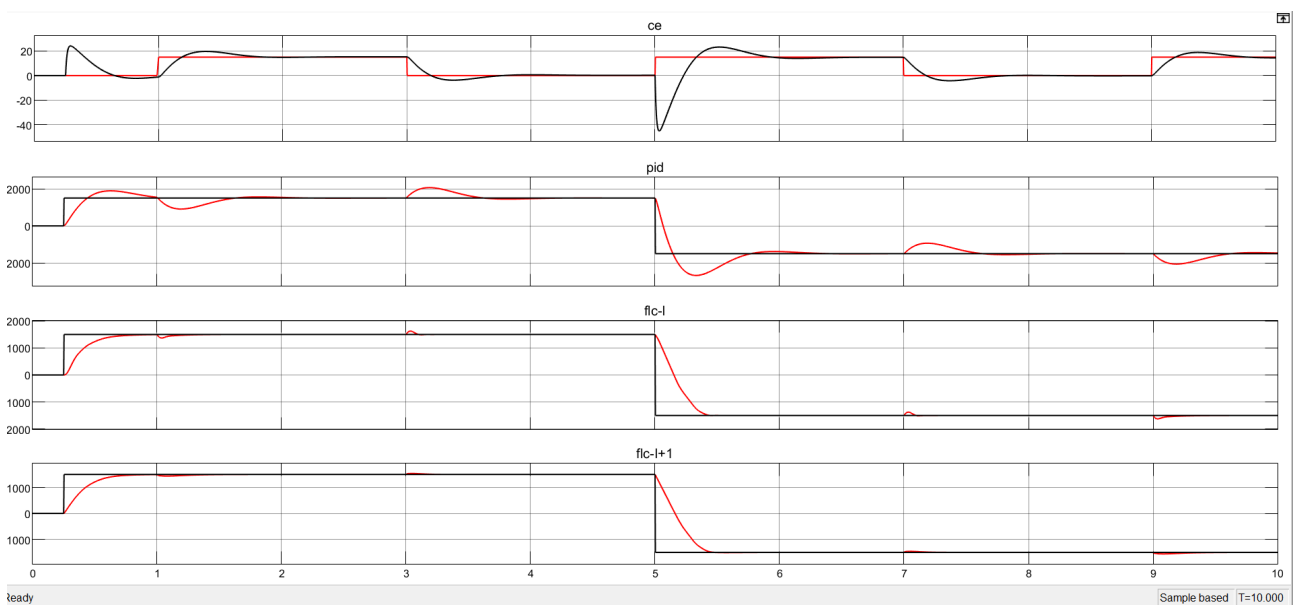


FIGURE 3.14 – Variaton du couple résistant avec différents régulateurs

FIGURE 3.15

		Δ_m	
PI	600	566	570
Flou inc	150	125	124
Flou PI	60	40	40

TABLE 3.4 – Table de déplacement de chaque régulateur

3.10 Test de robustesse

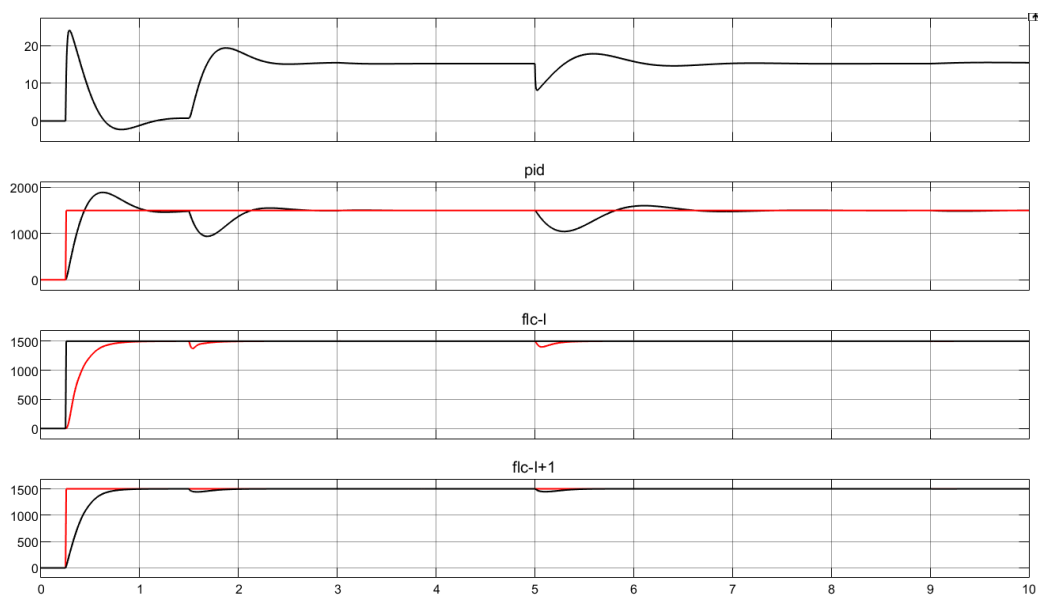


FIGURE 3.16 – Simulation test de robustesse

augmentation de J_m à $2*J_m$ à 3s		
régulateur	n_{\min}	Δn
PI	950tr.mn^{-1}	550tr.mn^{-1}
FInc	1375tr.mn^{-1}	125tr.mn^{-1}
FPD+I	1442.2tr.mn^{-1}	57.8tr.mn^{-1}

augmentation de R_a à $2*R_a$ à 5s		
régulateur	n_{\min}	Δn
PI	1045tr.mn^{-1}	455tr.mn^{-1}
FInc	1400tr.mn^{-1}	100tr.mn^{-1}
FPD+I	1446.2tr.mn^{-1}	53.8tr.mn^{-1}

augmentation de f_v à $2*f_v$ à 9s		
régulateur	n_{\min}	Δn
PI	1486.5tr.mn ⁻¹	13.5tr.mn ⁻¹
FInc	1498tr.mn ⁻¹	2tr.mn ⁻¹
FPD+I	1498.74tr.mn ⁻¹	1.26tr.mn ⁻¹

3.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié le réglage flou avec une synthèse de la matrice de règle comprenant 3,5 et 7 variables linguistiques par ailleurs dans la structure on a simulé le contrôle avec régulateur flou incrémental et PI-flou. De ces deux simulations le PI-flou donne de meilleurs résultats par rapport au flou incrémental.

Conclusion générale

Le domaine de la régulation des variateurs de vitesse est devenu un sujet de recherche majeur, notamment pour les industries. Le développement de cette technologie a connu une croissance remarquable, avec de nombreuses stratégies de régulation mises au point.

Après avoir parcouru les différents chapitres de cette étude, il est clair que nous avons pu explorer en profondeur les fondements théoriques et les applications pratiques de la régulation des systèmes, en mettant particulièrement l'accent sur la régulation floue d'une machine à courant continu couplée à un convertisseur DC-DC de type buck

Dans le premier chapitre, nous avons abordé la modélisation de la machine, ainsi que ses quadrants de fonctionnement. De plus, nous avons présenté le convertisseur DC-DC buck et les différentes configurations de hacheurs en boucle ouverte. Le deuxième chapitre nous a plongés dans la théorie de la commande classique, où nous avons examiné en détail les actions de réglage telles que la proportionnelle, l'intégrale et la Proportionnelle-intégral, ainsi que leur impact sur le processus de régulation pour en déduire le régulateur conjugué PI-mixte. Enfin nous avons vu son impact sur le réglage du processus tel que rapidité et erreur statique. Enfin, le troisième chapitre nous a conduit dans le domaine de la logique floue, une approche novatrice de la régulation. Nous avons défini les bases théoriques de la logique floue, nous avons en particulier étudié un réglage PI-flou, illustrant ainsi les avantages et les particularités de cette approche par rapport aux méthodes classiques. Après avoir obtenu les résultats de la régulation de la vitesse pour les deux régulateurs, nous avons constaté que les performances des deux régulateurs étaient satisfaisantes. Toutefois, le régulateur flou a montré un léger avantage en termes de rapidité, précision et stabilité lorsqu'une action intégrale était ajoutée. En conclusion, cette étude nous a permis de comprendre en profondeur les principes et les techniques de la régulation des systèmes, en explorant à la fois les approches classiques et les approches innovantes. Nous espérons que cette analyse approfondie servira de base solide pour de futures recherches et applications dans le domaine de la régulation des systèmes dynamiques.

Bibliographie

- [1] Moteur à courant continu - principe. https://dautrylimoges.scenari-community.org/TSTI2D/Seq2-ratique%20sportive_web/co/Moteur_a_Courant_Continu_Principe.html.
- [2] Mahieddine AYAD. *Commande en temps réel d'un pendule inversé rotatif par la logique floue*. PhD thesis, Directeur : Mr MERAD Lotfi/Co-Directeur : Mr ARICHI Fayssal, 2023.
- [3] Mohammed Fouzi Azzouni and Ibrahim Benbouziane. *Commande floue d'un moteur à courant continu*. Diplôme de master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –, 2022.
- [4] Hansruedi Bühler. *Réglage par logique floue*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 1994.
- [5] François Chevré and François Guély. La logique floue. *Cahier technique*, 191 :1–28, 1998.
- [6] Jan Jantzen. Tuning of fuzzy pid controllers. *Technical University of Denmark, Department of Automation, Bldg 326, DK-2800 Lyngby, DENMARK. Tech. report no 98-H 871 (fpid)*, pages 1–22, 1998.
- [7] Ferhat Lahouazi. *Mise en oeuvre d'une stratégie de commande neuro floue : Application à un pendule inversé*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri Tizi-ouzou, 2011.
- [8] Yassar Nakoula. *Apprentissage des modèles linguistiques flous, par jeu de règles pondérées*. PhD thesis, Chambéry, 1997.
- [9] Lahmar Oussama and Djeddi Seif Eddine. *Etude comparative entre la commande par logique floue et régulateur pi d'un m.c.c.* Mémoire de master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2019.
- [10] Ahmed Rubaai, Daniel Ricketts, and M David Kankam. Experimental verification of a hybrid fuzzy control strategy for a high-performance brushless dc drive system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37(2) :503–512, 2001.

المخلص

تعتبر الآلات الكهربائية أساسية، خاصة في القطاع الصناعي، حيث تُستخدم غالبًا في المنشآت ذات السرعة المتغيرة. ومع ذلك، فإن

تنظيم سرعتها الدورانية خطوة أساسية لضمان التشغيل السليم للعمليات الصناعية. العمل المقدم في هذه الرسالة يستند إلى دراسة ومحاكاة في برنامج MATLAB Simulink لتشغيل آلة تيار مستمر متصلة بمحول DC-DC (Buck) وموجودة في حلقة التحكم في السرعة. تم استخدام نوعين من المنظمات، وهما المنظم PI التقليدي والمنظم PI-الضبابي بثلاثة أنواع من مصفوفات القواعد. الخطوة التالية هي مقارنة الأداء، خصوصًا سرعة دوران الآلة، الناتجة عن هذه المحاكاة.

الكلمات المفتاحية: PI-flou,PI,DC,Buck.

Résumé

Les machines électriques sont essentielles, surtout dans le secteur industriel, où elles sont souvent utilisées dans des installations à vitesse variable. Toutefois, la régulation de leur vitesse de rotation est une étape fondamentale pour le bon fonctionnement des processus industriels.

Le travail présenté dans ce mémoire repose sur l'étude et la simulation sous MATLAB Simulink du fonctionnement d'une machine à courant continu couplée à un convertisseur DC-DC(Buck) et placée dans une boucle de réglage de vitesse. Cependant deux types de régulateurs ont été utilisés à savoir le régulateur PI classique et le régulateur PI-flou avec 3 types de matrices de règles.

Il s'agit ensuite de comparer les performances, notamment la vitesse de rotation de la machine, issues de ces simulations.

Mots clés: PI-flou,PI,DC,Buck.

Abstract

Electric machines are essential, especially in the industrial sector, where they are often used in variable speed installations. Nevertheless, regulating their rotational speed is a fundamental step for the proper functioning of industrial processes.

The work presented in this thesis is based on the study and simulation in MATLAB Simulink of the operation of a direct current machine coupled with a DC-DC (Buck) converter and placed in a speed control loop. Two types of regulators were used, namely the classic PI regulator and the PI-fuzzy regulator with three types of rule matrices.

The next step is to compare the performances, particularly the rotational speed of the machine, resulting from these simulations.

Keywords: PI-flou,PI,DC,Buck.