

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2019



MEMOIRE

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

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Automatique

Spécialité: Automatique et informatique industrielle

Par: DEBOUZE Aymen et KELAIAIA Achref

Thème

Commande floue des machines électriques

Soutenu publiquement, le 02 / 07 / 2019, devant le jury composé de:

M. BABOURI Abdesselam	Professeur	Univ. Guelma	Président
M. BOUDJAHM Baderddine	MCA	Univ. Guelma	Encadreur
Mme. BOUCERREDJ Leila	MCA	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire: 2018/2019

Remerciements 1

En préambule à ce mémoire, je souhaitais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont et contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur **Boudjehem Badr Eddine** de l'université 08 Mai 1945 Guelma, qui en tant que Directeur de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour

Une pensée particulière est adressée à l'ensemble des enseignants du département d'automatique, qui nous ont procuré une formation honorable

Mes remerciements s'adressent également à monsieur **Kelaiaia Achref** étudiant à l'université 08 mai 1945 Guelma corédacteur de ce mémoire, il sans que ce travail n'aurais pu voir le jour ; pour sa générosité et la grande patience dont il a su faire preuve malgré ses charges académiques pour la rédaction de ce mémoire.

J'exprime ma gratitude à tous les consultants et internautes rencontrés lors des recherches effectuées et qui ont accepté de répondre à mes questions avec gentillesse.

Je n'oublie pas mes parents **Maman Nassima, Papa Rabah** pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers mes sœurs **Aya et Meriem**, sans oublié chère frère **Hamdi**, mes amis proche .

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et ainsi qu'à toute les personnes rencontrées et qui m'ont toujours soutenues et encouragées au cours de la réalisation de mémoire.

Ce travail a été réalisé grâce à la volonté de **DIEU** le tout puissant qui veille du haut firmament.

Merci à tous et à toutes que la paix et mon amour pour vous vous accompagne.

Debouze Aymen

Remerciements 2

En préambule à ce mémoire, je souhaitais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont et contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur **Boudjehem Badr Eddine** de l'université 08 Mai 1945 Guelma, qui en tant que Directeur de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour

Une pensée particulière est adressée à l'ensemble des enseignants du département d'automatique, qui nous ont procuré une formation honorable

Mes remerciements s'adressent également à monsieur **Debouze Aymen** étudiant à l'université 08 mai 1945 Guelma corédacteur de ce mémoire, il sans que ce travail n'aurais pu voir le jour ; pour sa générosité et la grande patience dont il a su faire preuve malgré ses charges académiques pour la rédaction de ce mémoire.

J'exprime ma gratitude à tous les consultants et internautes rencontrés lors des recherches effectuées et qui ont accepté de répondre à mes questions avec gentillesse.

Je n'oublie pas mes parents **Maman Nadia, Papa Djamel** pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers mes sœurs **Bouthaina** et **Marwa**, sans oublié petit frère **Anis**, mes amis proche .

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et ainsi qu'à toute les personnes rencontrées et qui m'ont toujours soutenues et encouragées au cours de la réalisation de mémoire.

Ce travail a été réalisé grâce à la volonté de **DIEU** le tout puissant qui veille du haut firmament.

Merci à tous et à toutes que la paix et mon amour pour vous vous accompagne.

Kelaiaia Achref

INTRODUCTION GENERALE	01
CHAPITRE I : Commande classique	
I.1. Introduction	02
I.2. Notion de système	02
I.2.1. Performance d'un système	03
I.2.1.1. Point d'équilibre	03
I.2.1.2. Stabilité	03
I.2.1.3. Rapidité	04
I.2.1.4. Précision	05
I.3. Régulation classique	06
I.3.1. Définition	06
I.3.2. Objectifs de la régulation	06
I.3.3. Schéma fonctionnelle d'une boucle de régulation	06
I.4. Correcteurs classiques	07
I.4.1. Description des régulateurs PID	07
I.4.2. Contrôle par PID	07
I.4.2.1. Proportionnel « P »	07
I.4.2.2. Intégré « I »	07
I.4.2.3. Dérivé « D »	08
I.4.3. Différentes Structures D'un Pid	09
I.4.3.1. PID série	09
I.4.3.2. PID parallèle	09
I.4.3.3. PID standard	10
I.4.4. Principale différence	10
I.4.5. Domaine d'application	11
I.4.6. Avantages et inconvénients du régulateur PID	11
I.4.7. Limites du régulateur PID	12
I.5. Conclusion	12
CHAPITRE II : Commande floue	
II.1. Introduction	13
II.2. Historique	13
II.3. Exemple introductif	14
II.4. Principe de la logique floue	15
II.4.1. Ensembles flous	15
II.4.2. Concept de la logique floue	16
II.4.3. Variables linguistiques	16
II.4.4. Univers du discours	16
II.4.5. Fonction d'appartenance	16
II.4.6. Relations floues	17
II.4.6.1. Conjonction	17
II.4.6.2. Disjonction floue	17

II.4.6.3. Implication floue	17
II.5. Structure d'un système de commande flou	18
II.5.1. Interfaces de fuzzification	18
II.5.2. Base de connaissance	19
II.5.3. Inférence floue	19
II.5.3.1. Définition des règles d'inférence	20
II.5.3.2. Méthodes d'inférence	20
II.5.3.2.1. Méthode d'inférence max-min	20
II.5.3.2.2. Méthode d'inférence max-prod	22
II.5.3.2.3. Méthode d'inférence somme-prod	22
II.5.4. Interface de défuzzification	22
II.5.4.1. Méthode de la moyenne de maximums	23
II.5.4.2. Méthode du centre gravité	23
II.6. Domaines d'applications de la logique floue	24
II.7. Avantages et Inconvénients du réglage par logique floue	24
II.7.1. Avantages	24
II.7.2. Inconvénients	25
II.8. Conclusion	25

Chapitre III : Application de la commande floue sur MCC

III.1. Introduction	26
III.2. Moteurs à courant continu	26
III.2.1. Définition	26
III.2.2. Constitution	26
III.2.3. Différents types de moteur à courant continu	27
III.2.3.1. Moteur à excitation séparée	27
III.2.3.2. Moteur à excitation série	28
III.2.3.3. Moteur à excitation shunt	28
III.2.3.4. Moteur à excitation composée	28
III.3. Avantage et les inconvénients du moteur à courant continu	29
III.3.1. Avantages des moteurs à courant continu	29
III.3.2. Inconvénient du moteur à courant continu	29
III.4. Modélisation	30
III.4.1. Fonction de transfert du moteur	31
III.5. Commande floue	32
III.5.1. Contrôleur	32
III.5.2. Règles d'inférence	33
III.5.3. Fonction d'appartenance	33
III.6. Simulation	34
III.6.1. Robustesse du contrôleur floue	38
III.7. Conclusion	39
Conclusion générale	40

Référence bibliographique
Annexe

Chapitre I

Figure I.1 : Modèle générale d'un système	02
Figure I.2 : Chauffage d'une pièce	03
Figure I.3 : Commande d'un moteur	03
Figure I.4 : Système stable	04
Figure I.5 : Système instable	04
Figure I.6 : Schéma d'une boucle de régulation	06
Figure I.7 : PID en série	09
Figure I.8 : PID en parallèle	09
Figure I.9 : PID standard	10

Chapitre II

Figure II.1 : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique classique	14
Figure II.2 : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue	15
Figure II.3 : Formes des fonctions d'appartenances	17
Figure II.4 : Structure de base d'un système de commande floue	18
FigureII.5 : Définition d'ALORS dans la méthode d'inférence max-min	20
Figure II.6 : Définition de OU dans la méthode d'inférence max-min	21
FigureII.7 : Fonction d'appartenance résultante	21
FigureII.8 : Définition d'ALORS dans la méthode d'inférence max-prod	22
FigureII.9 : Définition de OU dans la méthode d'inférence max-prod	22
FigureII.10 : Défuzzification par la méthode du centre de gravité	23

Chapitre III

Figure III.1 : Fonctionnement de machine à courant continu.	26
Figure III.2 : Description d'un moteur à courant continu	27
Figure III.3 : moteur à excitation séparée	27

Figure III.4 : moteur à excitation série	28
Figure III.5 : moteur à excitation shunt	28
Figure III.6: moteur à excitation composée	29
Figure III.7 : Moteur a courant continue a excitation séparé	30
Figure III.8 : Schéma bloc du modèle de moteur électrique en vitesse	32
Figure III.9 : structure de la commande floue	32
Figure III.10: Fonction d'appartenance pour e (forme triangulaire)	33
Figure III.11: Fonction d'appartenance pour de (forme gaussienne)	33
Figure III.12 : Fonction d'appartenance pour id (forme trapézoidal)	34
Figure III.13 : Bloc de la commande en vitesse d'un moteur à courant continu par RLF	34
Figure III.14 : Réponse en échelon de la vitesse du moteur obtenu par le contrôleur flou 1.	35
Figure III.15 : Réponse en échelon de la vitesse du moteur obtenu par le contrôleur flou 2.	36
Figure III.16 : Réponse en échelon de la vitesse du moteur obtenu par le contrôleur flou 3.	37
Figure III.17 : Réponse en échelon avec variations des paramètres 'constantes de temps t_m et t_e '.	38
Figure III.18 : Réponse en échelon avec variations des paramètres 'gain'	39

Chapitre 03

Tableau III.1 : Table des règles floue pour la sortie id(contrôleur 1)	35
Tableau III.2 : Table des règles floue pour la sortie id(contrôleur 2)	36
Tableau III.3 : Table des règles floue pour la sortie id(contrôleur 3)	37
Tableau III.4 : Table d'évaluation pour les performances de la réponse Du système	38

Symbole	Signification
$e(t)$	L'entrée de système .
$s(t)$	la sortie de système.
$\varepsilon(\tau)$	L'erreur statique.
τ, t	Temps.
K_p	Gain d'action proportionnelle.
K_i	Gain d'action intégrale.
K_d	Gain d'action dérivé.
τ_p	Constante de temps, dite temps d'action proportionnelle.
τ_i	Constante de temps, dite temps d'action intégrale.
τ_d	Constante de temps, dite temps d'action dérivé.
μA	Fonction d'appartenance.
$\mu A(x)$	Degré d'appartenance.
U	L'univers du discours.
A,B	Sous-ensembles flous.
ω_i	Valeur maximal.
Nm	Nombre des maximas.
N	Négative.
NG	Négative grand.
Z	Zéro.
P	Positive
PG	Positive grand.
A	Espace flou de sortie.
$u(t)$	Tension appliquée au moteur.
$i(t)$	Intensité traversant le moteur.
Cu	Couple moteur généré.
f	Coefficient de frottement visqueux.
Ke	Constante de vitesse.
$E(t)$	Force contre électromotrice.
$\Omega(t)$	Vitesse de rotation du rotor.
Cr	Couple résistant.

J	Moment d'inertie de l'axe du rotor.
Kc	Constante de couple.
L	L'inductance.

Abréviations

MCC : Moteur a courant continue

PID : Proportionnel Intégral Dérivé.

RLF : Régulateur à logique floue

Les méthodes classiques de l'automatique ont été largement appliquées dans de nombreux problèmes de régulation industrielle. Cependant, la plupart des systèmes physiques présentent des non-linéarités, un retard important et leurs paramètres sont souvent mal connus et/ou variables dans le temps (systèmes incertain). Pour la commande de telles classes de systèmes, les méthodes conventionnelles de l'automatique ont montré leurs limites en termes de stabilisation et performances. Suite aux développements des calculateurs numériques, les automaticiens commencent à s'intéresser aux nouvelles approches de commande telles que la commande adaptative, la commande prédictive, la commande robuste, ainsi que les techniques basées sur l'intelligence artificielle par exemple la commande par logique floue.

Cette commande est à l'heure actuelle une des préoccupations des chercheurs dans le monde. Les systèmes d'inférence flous possèdent deux points forts ; le premier est qu'ils sont généralement construits à partir de la connaissance humaine, et le deuxième réside dans leur capacité descriptive due à l'utilisation des variables linguistique. Le but de ce travail est de concevoir un contrôleur flou pour la commande des machines à courant continu.

Ce mémoire comporte trois chapitres :

Le premier chapitre présente les systèmes de commande classique à l'aide des correcteurs PID.

Le deuxième chapitre introduit les notions de base de la logique floue et son application la commande des systèmes.

Dans le dernier chapitre nous présentons la commande floue d'un moteur à courant continu à excitation séparé.

CHAPITRE I

Commande classique

I.1. Introduction

La commande PID est dite aussi (correcteur, régulateur, contrôleur), se compose de trois termes P, I et D d'où le 'p' correspond au terme proportionnel, 'I' pour terme intégral et 'D' pour terme dérivé de la commande. Les régulateurs PID sont probablement les plus largement utilisés dans l'industrie.

Même les plus complexes systèmes de contrôle industriels ont un réseau de contrôle dont le principal élément de contrôle est un module de contrôle PID.

Le régulateur PID est une simple implémentation de retour d'information (feedback). Il a la capacité d'éliminer la compensation de l'état d'équilibre grâce à l'action intégrale, et il peut anticiper le futur grâce à une action dérivée [1][2].

I.2. Notion de système

Un système ou processus peut être défini comme un ensemble des éléments exerçant collectivement une fonction déterminée. Un système communique avec l'extérieur par l'intermédiaire de grandeurs, fonctions du temps, appelées signaux. [3][5] Un système peut être représenté schématiquement de la manière de la figure I.1 suivante :

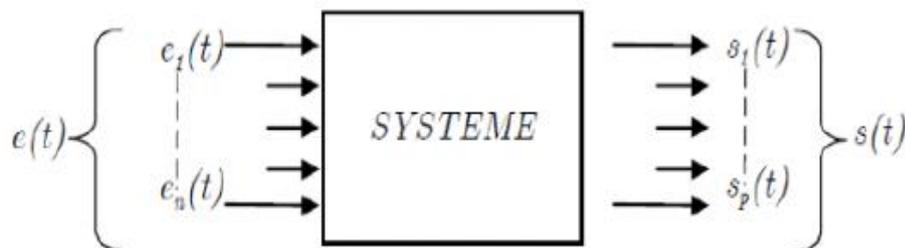


Figure I.1 : Modèle général d'un système

Où $e(t)$ est un ou plusieurs signaux d'entrée (excitation, cause ou sollicitation) et $s(t)$ est un ou plusieurs signaux de sortie (ou réponses), t étant la variable temps. En général, ces signaux (d'entrée et de sortie) ne sont pas de même nature. Les grandeurs d'entrée sont les grandeurs qui agissent sur le système. Il en existe deux types :

- Commandes : Celles que l'on peut maîtriser.
- Perturbations : Celles que l'on ne peut pas maîtriser.

Les signaux de sortie d'un système sont aussi appelés réponse du système. Un système possédant une seule entrée est dit mono variable, si de plus il possède une seule sortie, il est

dit scalaire. Pour observer les grandeurs de sortie, on utilise des capteurs. C'est l'information de ces capteurs qui va permettre d'élaborer la commande. [4]

Exemples :

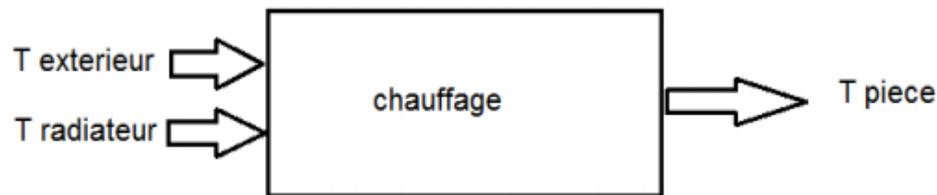


Figure I.2 : Chauffage d'une pièce

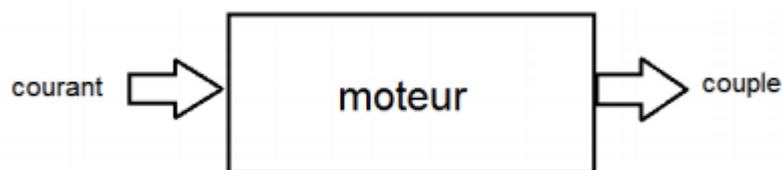


Figure I.3 : Commande d'un moteur

I.2.1. Performance d'un système

I 2.1.1. Point d'équilibre

Le système est dans un état d'équilibre si, placé dans cet état, il ne quitte pas. La valeur du signal de mesure est alors constante [5].

I 2.1.2. Stabilité

Plusieurs définitions de la stabilité peuvent être données. Définition intuitive Un système est dit stable par rapport à une consigne de sortie, si lorsqu'il subit une faible perturbation, il tend à revenir vers la consigne de sortie. Deuxième définition Un système est dit stable si seulement si à une entrée bornée $e(t)$ correspond une sortie bornée $s(t)$. Cette définition permet de qualifier la stabilité des systèmes forcés. Un état d'équilibre est stable si, lorsqu'on éloigne le système de cet état, il finit par y revenir. Dans le cas contraire, le point d'équilibre est instable. Dans certain cas, cette propriété de stabilité n'est valable que si l'éloignement est faible ; on parle alors de stabilité locale. Si au contraire le système retourne dans son état

d'équilibre quel que soit l'amplitude de la perturbation [5], on parle alors de stabilité globale comme la figure I.4 et figure I.5.

1 : consigne.
2 : système stable.

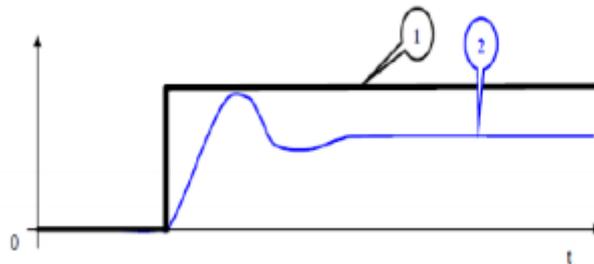


Figure I.4 : Système stable

1 : consigne.
2 : système instable

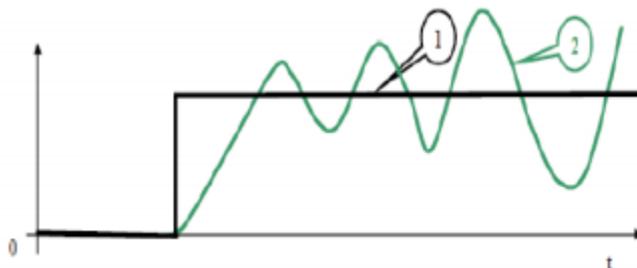


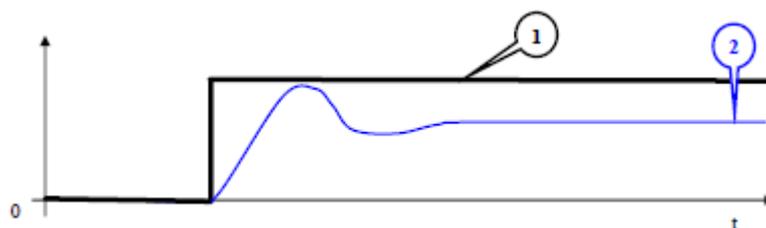
Figure I.5 : Système instable

I 2.1.3. Rapidité

C'est la capacité du système à atteindre dans les meilleurs délais son régime stable (valeur finale qui peut être différente de la valeur de consigne si le système est mal réglé).

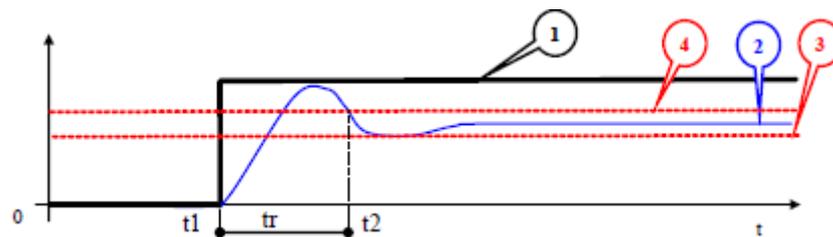
La rapidité d'un système est définie par son temps de réponse t_r (plus t_r est petit plus le système est dit rapide).

Dans l'exemple suivant, la courbe noire (1) représente la consigne et la bleue (2) représente la réponse du système. La valeur finale du système est nommée v_f .



Pour déterminer le temps de réponse d'un système :
– on trace une droite à 95% de la valeur finale v_f (3).

– on trace ensuite une droite à 105% de la valeur finale v_f (4).



1 : consigne.

2 : valeur finale du système.

3 : droite à 95% de la valeur finale.

4 : droite à 105% de la valeur finale.

Le temps de réponse à 5 % correspond à la différence entre le temps t_2 (temps à partir duquel la courbe entre dans l'intervalle 95% /105% sans en sortir) et le temps t_1 (temps à partir duquel la consigne est active).

I.2.1.4. Précision

C'est la capacité du système à se rapprocher le plus possible de la valeur de consigne.



1 : consigne

2 : système peu précis.

3 : système précis.

E_2 : erreur statique liée à la courbe 2.

E_3 : erreur statique liée à la courbe 3.

L'erreur s'exprime en pourcentage de la valeur de consigne

I.3. Régulation classique

I.3.1 Définition

La régulation est l'action de régler automatiquement une grande temps réel pour minimiser l'écart entre une grandeur mesurée et une consigne en agissant sur une grandeur de commande quelles que soient les perturbations qui peuvent subvenir.

I.3.2. Objectifs de la régulation

L'objectif de la régulation est d'assurer le fonctionnement d'un procédé selon les critères prédéfinis par un cahier de charges. Les aspects de sécurité du personnel et des installations sont à prendre en compte comme ceux concernant l'énergie et le respect de l'environnements. Le cahier de charges définit des critères qualitatifs à imposer qui sont traduits le plus souvent par des critères qualitatifs, comme par exemple de : stabilité, rapidité, précision ou de lois d'évolution. Voici quelques exemples d'objectifs qualitatifs :

- Obtenir une combustion air-gaz correcte dans un brûleur.
- Maintenir une qualité constante d'un mélange de produits.
- Obtenir un débit de fluide constant dans une conduite en fonction des besoins.
- Faire évoluer une température d'un four selon un profil déterminé.

I.3.3. Schéma fonctionnelle d'une boucle de régulation

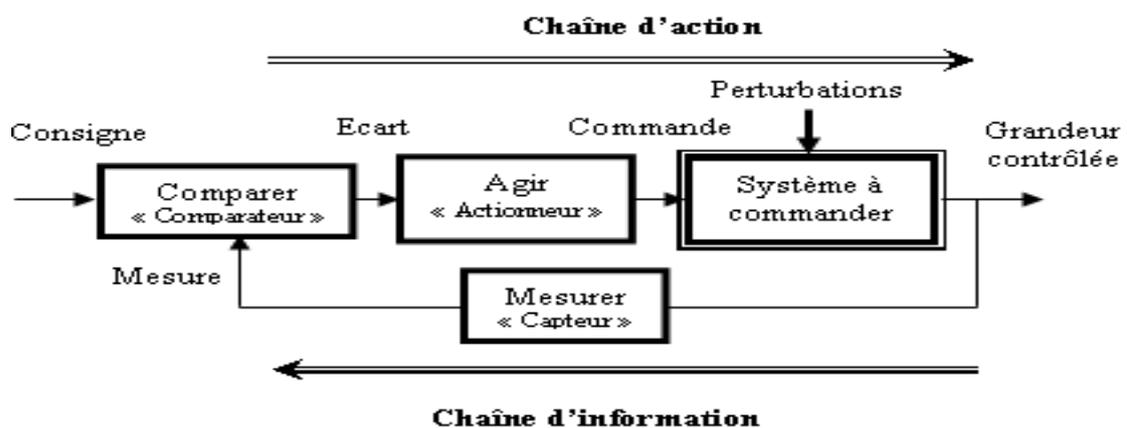


Figure I.6 : Schéma d'une boucle de régulation

I.4. Correcteurs classiques

Le correcteur classique est un système de contrôle permettant d'améliorer les performances d'une régulation

I.4.1. Description des régulateurs PID

Un régulateur PID remplit essentiellement trois fonctions :

- Fournir un signal de commande $u(t)$ en tenant compte de l'évolution du signal de sortie $y(t)$ par rapport à la consigne $y^*(t)$.
- Éliminer l'erreur statique grâce au terme intégrateur.
- Anticiper les variations de la sortie grâce au terme dérivateur.

I.4.2. Contrôle par PID

Le contrôle par PID (proportionnel, intégral et dérivé) est une méthode de régulation souvent employée pour les régulations.

Le PID est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie, L'idée de cet organe de contrôle est de modifier intentionnellement la valeur de l'erreur qui subsiste entre la consigne et la mesure effectuée. [6]

I.4.2.1. Proportionnel « P »

Dans le cas d'un contrôle proportionnel, l'erreur est virtuellement amplifiée d'un certain gain constant qu'il conviendra de déterminer en fonction du système.

$$\text{Consigne}(t) = K_p * \varepsilon(t) \quad (\text{I.1})$$

Ce qui en Laplace donne :

$$\text{Consigne}(p) = K_p * \varepsilon(p) \quad (\text{I.2})$$

L'idée étant d'augmenter l'effet de l'erreur sur le système afin que celui-ci réagisse plus rapide mentaux changements de consignes. Plus la valeur de K_p est grande, plus la réponse ne l'est aussi. En revanche, la stabilité du système s'en trouve détériorée et dans le cas d'un K_p démesuré le système peut même diverger.

Si l'on prend l'exemple d'une voiture qui dérive, la régulation proportionnelle consiste à contre braquer rapidement pour rétablir la voiture. [6]

I.4.2.2. Intégré « I »

Au contrôle proportionnel, nous pouvons ajouter l'intégration de l'erreur. Dans ce cas nous obtenons une régulation PI (proportionnelle et intégré).

L'erreur entre la consigne et la mesure est ici intégrée par rapport au temps et multipliée par une constante qu'il faudra aussi déterminer en fonction du système.

$$\text{Consigne}(t) = K_p * (t) + K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau \quad (\text{I.3})$$

Ce qui en La place donne :

$$\text{Consigne}(p) = K_p * (t) + K_i * \varepsilon(p) / p \quad (\text{I.4})$$

Et bien, lors d'un simple contrôle proportionnel, il subsiste une erreur statique. Lorsque le système s'approche de sa consigne, l'erreur n'est plus assez grande pour faire avancer le moteur. Le terme intégral permet ainsi de compenser l'erreur statique et fournit, par conséquent, un système plus stable en régime permanent. Plus K_i est élevé, plus l'erreur statique est corrigée.

Pour reprendre l'exemple de la voiture qui dérive, le terme intégral consiste à rajouter un petit coup de contre braquage afin de se rétablir correctement [6].

I.4.2.3. Dérivé « D »

Pour obtenir un contrôle en PID, il nous faut encore ajouter un terme. Celui-ci consiste à dériver l'erreur entre la consigne et la mesure par rapport au temps et a le multiplier lui aussi par une constante.

$$\text{Consigne}(t) = K_p * (t) + K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + K_d * d/dt * \varepsilon(t) \quad (\text{I.5})$$

Ce qui en Laplace donne :

$$\text{Consigne}(p) = K_p * (t) + K_i * \varepsilon(t) / p + K_d p \varepsilon(p) = \varepsilon(p) * [K_p + K_i * 1/p + K_d p] \quad (\text{I.6})$$

Et bien, le contrôle PI peut amener à un dépassement de la consigne, ce qui n'est pas toujours très souhaitable (exemple d'inversion de polarité dans le cas de moteurs électriques). Le terme dérivé permet de limiter cela. Lorsque le système s'approche de la consigne, ce terme freine le système en appliquant une action dans le sens opposé et permet ainsi une stabilisation plus rapide.

Toujours avec l'exemple de la voiture, le terme dérivé représente le petit contre braquage dans le sens opposé de l'ajustement pour stabiliser la voiture lorsqu'elle s'approche du point qu'elle voulait ré-joindre [6].

I.4.3. Différentes Structures D'un PID

Il existe plusieurs formes d'un PID :

I.4.3.1. PID série

$$C_{\text{série}}(s) = (1 + 1/(s\tau_i)) * (1 + s\tau_d) \quad (\text{I.7})$$

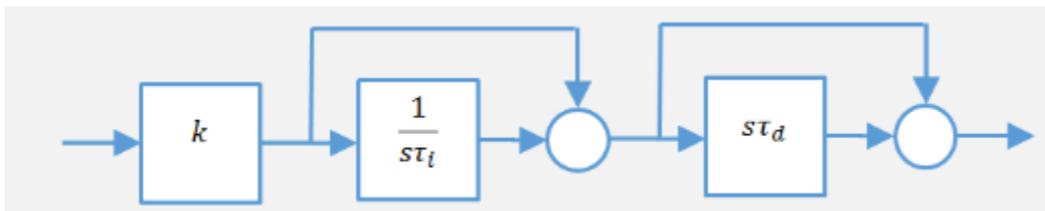


Figure I.7 : PID en série

I.4.3.2. PID parallèle

$$C_{\text{parallèle}}(s) = kp + ki/s + kds \quad (\text{I.8})$$

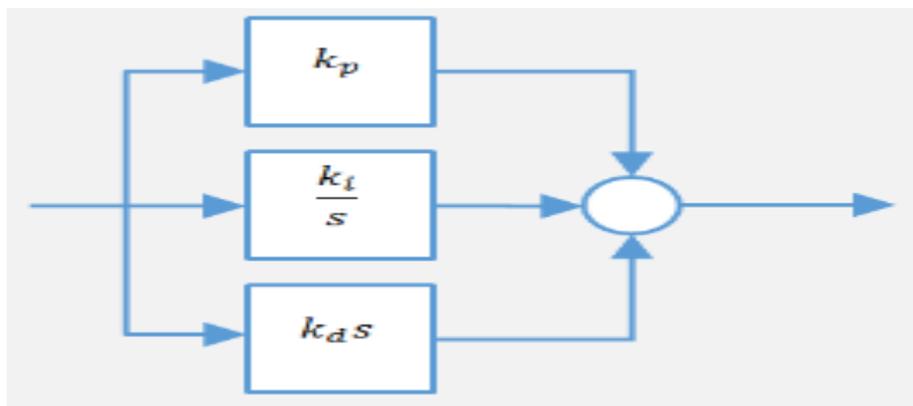


Figure I.8 : PID en parallèle

Ce qui est important de remarquer, c'est que ces deux formes sont mathématiquement équivalentes. Ainsi un régulateur sous forme série pourra être mis sous forme parallèle à partir des équations de transformation suivante :

$$k_p = k * (1 + \tau_d / \tau_i) \quad (\text{I.9})$$

$$k_i = k / \tau_i \quad (\text{I.10})$$

$$k_d = k \tau_d \quad (\text{I.11})$$

I.4.3.3. PID standard

Une 3ème forme de PID existe, Celle-ci est appelée "standard", "mixte" ou parfois "idéal". Elle est définie par l'équation ci-dessous.

$$(s) = k_p*(1+1/sT_i+sT_d) \quad (\text{I.12})$$

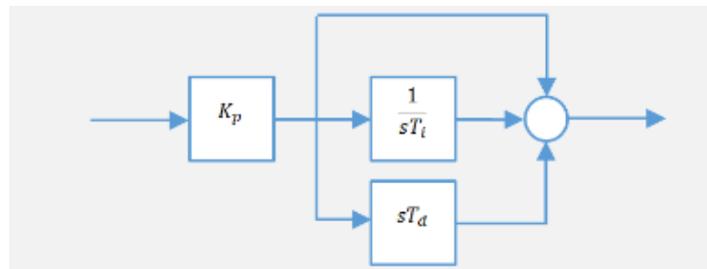


Figure I.9 : PID standard

Cette forme standard se rapproche beaucoup de la forme parallèle et les équations de transformation entre les deux sont évidentes. La transformation de la forme série en forme standard s'obtient par les équations suivantes :

$$k_p = k^*(1 + \tau_d / \tau_i) \quad (\text{I.13})$$

$$T_i = \tau_i + \tau_d \quad (\text{I.14})$$

$$T_d = \tau_d \tau_i / (\tau_d + \tau_i) \quad (\text{I.15})$$

Il existe donc trois formes différentes des mises en œuvre des régulateurs PID et ces trois formes sont presque mathématiquement équivalentes. Dans la plupart des cas (à l'exception par exemple de $\mathbf{ki=0}$), il existe des formules pour transformer un régulateur d'une forme vers une autre forme [5].

I.4.4. Principale différence

La principale différence entre ces différentes formes concerne l'effet des coefficients de réglage sur le comportement du régulateur. Ainsi la forme parallèle permet de découpler complètement les actions proportionnelle, intégrale et dérivée entre elles. Alors que dans la forme standard, une modification sur la valeur du coefficient K_p va modifier simultanément [7].

Les actions proportionnelles, intégrales et dérivée. Ce titre certaines personnes, qui règlent des PID de manière manuelle, préfèrent la forme parallèle.

Un autre point important à remarquer est que les formes série et standard ne permettent pas l'annulation de l'action intégrale et donc la transformation d'un régulateur de type PID en régulateur de type PD.

I.4.5. Domaine d'application

Dans le monde industriel, le régulateur PID est largement employé. Bien que relativement simple, cet algorithme soutient favorablement la comparaison avec des algorithmes plus sophistiqués, tant au point de vue de la performance que de la robustesse de la régulation vis-à-vis de non-linéarités ou variation du procédé. Par ailleurs, ce type d'algorithme est facile à implanter, ce qui plaide en sa faveur à l'époque des régulateurs pneumatiques ou même électroniques. C'est moins vrai aujourd'hui où derrière chaque régulateur se cache un microprocesseur.

Une qualité du PID est qu'il est facile à comprendre donc facile à régler et à maintenir. Ces raisons expliquent pourquoi il est si largement employé, le plus souvent sous la forme PI, l'action D est souvent mise à zéro [8].

I.4.6. Avantages et inconvénients du régulateur PID

La régulation par PID est aujourd'hui l'un des régulations les plus utilisés et ce pour plusieurs raisons. Premièrement, il est très simple à mettre en place et s'avère efficace pour la plupart des systèmes réels.

De plus, le calcul des coefficients laisse le choix entre plusieurs méthodes de difficulté croissante. D'une part, une méthode expérimentale très facile à mettre en place, permet d'obtenir rapidement des coefficients corrects pour des systèmes ne nécessitant pas de très grandes précisions dans la régulation.

D'autre part, des méthodes mathématiques avancées offrent des techniques pour obtenir les coefficients idéaux pour un système en particulier. Ainsi, la mise en place d'une régulation PID peut-être à la fois rapide et efficace et permettra une optimisation des coefficients pour les systèmes les plus avancés.

Cependant, il est important de noter que ce type de régulation est limité par un certain nombre de contraintes.

Tout d'abord, il peut s'avérer inefficace pour certains systèmes qui contiennent du bruit (coefficient Dérivé) ou qui ne sont pas linéaires (la régulation PID étant linéaire, la non-linéarité d'un système entraîne des instabilités).

Enfin, il est possible d'optimiser la réponse d'un système en multipliant les régulations (Comme par exemple le double régulation PID) [6].

I.4.7. Limites du régulateur PID

La commande classique basée sur les correcteur PID souffre d'un manque de robustesse si le système à commander présente l'une des propriétés suivante :

- ✓ Non linéarité (les systèmes non linéaires).
- ✓ Variation des paramètres des processus industriels.
- ✓ retard important : Introduisons un retard pur dans le système à commander.

Dans ce cas Il faut penser de concevoir des nouveaux contrôleurs avancés qui permet d'imposer les performances désirées.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, on a détaillé le fonctionnement du régulateur PID en précisant le rôle de chaque paramètre, ensuite, on a présenté un certain nombre d'approches pour calculer les actions d'un régulateur PID. On se pose la question : laquelle est la meilleure et laquelle faut-il choisir ? La réponse à cette question dépend de deux éléments : le type d'informations disponibles pour décrire le système et la finesse de spécification des performances souhaitées.

CHAPITRE II

Commande floue

II.1. Introduction

La logique floue est une extension de la logique classique qui permet la modélisation des imperfections des données et se rapproche dans une certaine mesure de la flexibilité du raisonnement humain. La logique floue est un outil permet de représenter des connaissances.

De nombreuses applications sont alors développées dans divers domaines, là où aucun modèle déterministe n'existe ou n'est non présentable, ainsi que dans des situations pour lesquelles l'imprécision sur les données rend le contrôle par méthodes classique impossible.

Dans la littérature, la logique floue et ses applications sont très vastes, Dans ce chapitre nous allons présenter les notions de base de la logique floue, et les différentes étapes du raisonnement flou ainsi que la structure de commande à base de la logique floue.

II.2. Historique

1965 : naissance du concept flou avec le professeur Zadeh Lotfi (université de Berkeley en Californie) il déclara que « un contrôleur électromécanique doté d'un raisonnement humain serait plus performant qu'un contrôleur classique » [9], et il introduit la théorie des « sous-ensembles flous ».

En 1973, le professeur Zadeh publie un article (dans ITSEE Transaction on système, Man and Cybernetiques) qui fit date. Il y mentionne pour la première fois le terme de la variable linguistique (dont la valeur est un mot et non un nombre).

En 1974 le docteur Mamdani (université de Londres) réalise un contrôleur flou expérimental sur un moteur à vapeur.

En 1980, F.L. Smith (au Danemark) met en application la théorie de la logique floue dans le contrôle du four à ciment. C'est la première mise en œuvre pratique de cette nouvelle théorie.

Dans les années 80, plusieurs applications commencent à immerger (notamment au Japon).

En 1987, explosion du flou au Japon (avec le contrôle du métro de Sendai) qui atteint son apogée en 1990.

Aujourd'hui une vaste gamme de nouveaux produits ont une étiquette ' produit floue ou fuzzy.

II.3. Exemple introductif

Afin de mettre en évidence le principe fondamental de la logique floue, on présente un exemple simple, celui de la classification des personnes en trois ensembles <jeune>, <entre deux âges >, <âgé>. Selon la logique classique (logique de Boole), qui n'admet pour les variables que les deux valeurs 0 et 1, une telle classification pourrait se faire comme la figure(II.1).

Toutes les personnes âgées de moins de 25 ans sont alors considérées jeunes et toutes les personnes âgées de plus de 50 ans comme des vieux.

fonction d'appartenance

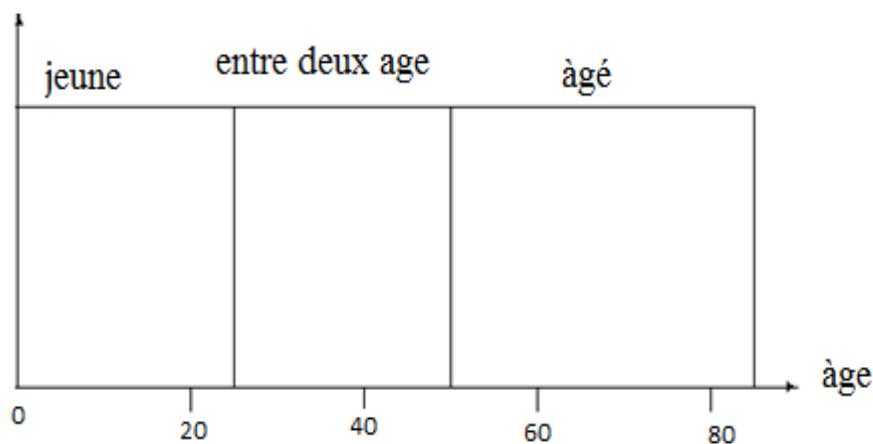


Figure II.1 : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique classique.

Cependant, une telle logique de classification n'est même pas logique. Pourquoi une personne, lorsqu'elle a eu 50 ans, doit-elle être considérée comme appartenant à l'ensemble <âgé>?.

En réalité, un tel passage se fait progressivement et individuellement. La logique floue, dont les variables peuvent prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 1, permet de tenir compte de cette réalité. Les limites ne varient pas soudainement, mais progressivement.

La figure (II.2) montre une classification possible pour l'exemple précédent, cette fois-ci à l'aide de la logique floue. Ainsi une personne de 25 ans appartient à l'ensemble <jeune> avec une valeur $\mu = 0,75$ de la fonction d'appartenance et à l'ensemble <entre deux âges> avec $\mu = 0,25$.

Par contre une personne agréée de 65 ans appartient avec une valeur $\mu = 1$ de la fonction d'appartenance à l'ensemble <âgé>.

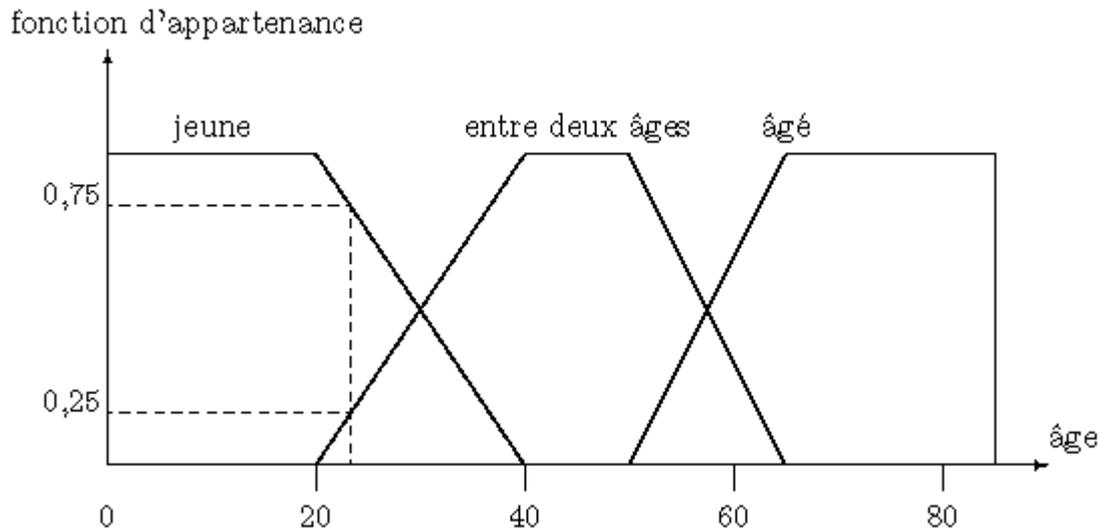


Figure II.2 : Classification des personnes en trois ensembles et on la logique floue.

II.4. Principe de la logique floue

II.4.1. Ensembles flous

Si la fonction caractéristique d'un ensemble classique ne peut prendre que deux valeurs soit 1 ou bien 0, la fonction d'un ensemble flou peut prendre toutes les valeurs comprises entre 0 et 1.

On définit alors un sous ensemble A de U comme suit :

$$A = \{x / \mu_A(x), \forall x \in U\}.$$

$\mu_A(x)$ degré d'appartenance de l'élément x au sous-ensemble flou A.

μ_A : est la fonction d'appartenance définie dans l'intervalle [0,1].

$\mu_A : U \rightarrow [0,1]$.

$x \in U \rightarrow \mu_A(x)$.

II.4.2. Concept de la logique floue

La pensée humaine est un mélange de la logique et de l'imagination. C'est-à-dire une superposition de rigueur et d'intuition agissant ensemble ou séparément. La logique humaine est un enchaînement d'idées et de concepts aboutissant à des conclusions qui entraînent des décisions.

Le caractère flou de la pensée humaine est illustré par sa capacité de résumer les informations pour extraire à partir des collections de données une conclusion en rapport avec la tâche considérée.

En termes plus formels, la logique floue vise à modéliser les aspects qualificatifs imprécis et incertains. [10]

II.4.3. Variables linguistiques

L'utilisation des ensembles flous offre une base pour une voie systématique de manipulation des concepts vagues et imprécis. On peut alors employer les ensembles flous pour représenter des variables linguistiques. Une variable linguistique est une variable dont les valeurs sont des mots ou des phrases dans un langage naturel ou systématique.

II.4.4. Univers du discours

C'est l'ensemble noté U , qui contient toutes les valeurs que peut prendre la variable linguistique. Un des premiers pas dans la conception d'une application floue est de définir l'ensemble de référence ou univers de discours pour chaque variable linguistique. L'univers de discours est l'ensemble de référentiel qui contient tous les éléments qui sont en relation avec le contexte de donné. [11] La notion d'univers de discours se conçoit aisément : reprenons le concept d'âge : l'utilisateur pourra décrire la variable « âge » par un certain nombre de mots. Par exemple « jeune », « entre deux âges » et « âgé ». Pour chacun de ces prédicats, on pourra donner une fonction d'appartenance. L'univers de discours d'une variable couvre l'ensemble des valeurs prises par cette variable.[12]

II.4.5. Fonction d'appartenance

La fonction d'appartenance permet de décrire l'évolution du degré de vérité de la variable linguistique dans l'univers de discours U . Elle peut prendre plusieurs formes, les plus utilisées sont :

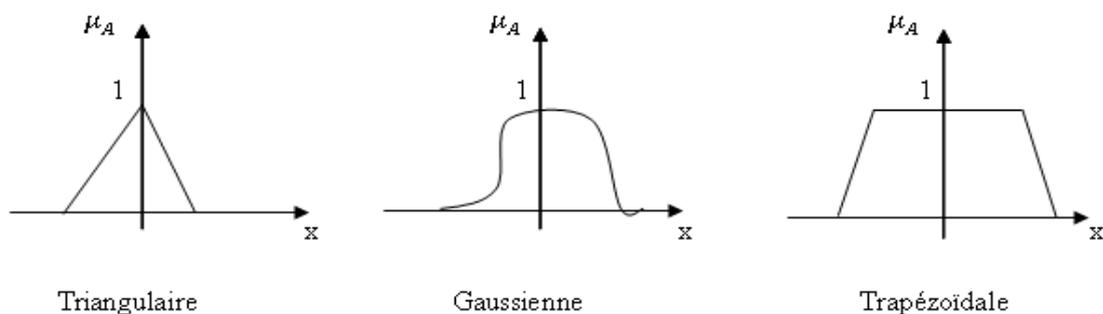


Figure II.3 : Formes des fonctions d'appartenances.

II.4.6. Relations floues

Une relation floue entre deux sous-ensembles flous A et B dans les univers de discours U_1 et U_2 respectivement, est un sous ensemble flou R dans l'univers $U = U_1 \times U_2$ (produit cartésien) dont la fonction d'appartenance s'exprime par :

$$u_R(x, y) = F(u_A(x), u_B(y)) \quad (\text{II.1})$$

II.4.6.1. Conjonction

L'opération logique « ET » entre A et B peut être définie par la relation :

$$u_{AB}(x, y) = \text{Min}(u_A(x), u_B(y)) \quad (\text{II.2})$$

$$u_{AB}(x, y) = \text{Min}(u_A(x), u_B(y)) \quad (\text{II.3})$$

II.4.6.2. Disjonction floue

L'opération logique « OU » entre A et B peut être définie par la relation :

$$u_{A+B} = \text{Max}(u_A(x), u_B(y)) ; (\text{Union floue}) \quad (\text{II.4})$$

Ou sous forme :

$$u_{A+B} = u_A(x) + u_B(y) - u_A(x) \cdot u_B(y) ; (\text{Somme algébrique}) \quad (\text{II.5})$$

II.4.6.3. Implication floue

L'implication linguistique est un autre exemple de relation entre A et B, elle est notée $(A \rightarrow B)$.

Exemple :

Si A est a alors B est b

Cette relation conditionnelle floue est représentée par un sous-ensemble flou dont la fonction d'appartenance peut être

-Opérateur Min : $U_{A \rightarrow B}(x, y) = \min(u_A(x), u_B(y)) \quad (\text{II.06})$

-Opérateur algébrique : $U_{A \rightarrow B}(x, y) = \min(u_A(x), u_B(y)) \quad (\text{II.07})$

II.5. Structure d'un système de commande floue

La structure de base d'un système de commande floue est représenté par la figure (II.4) Ce schéma est composé de :

- ✓ Une interface de fuzzification à l'entrée.
- ✓ Une base de connaissance.

- ✓ Une logique de prise de décision.
- ✓ Une interface de défuzzification à la sortie

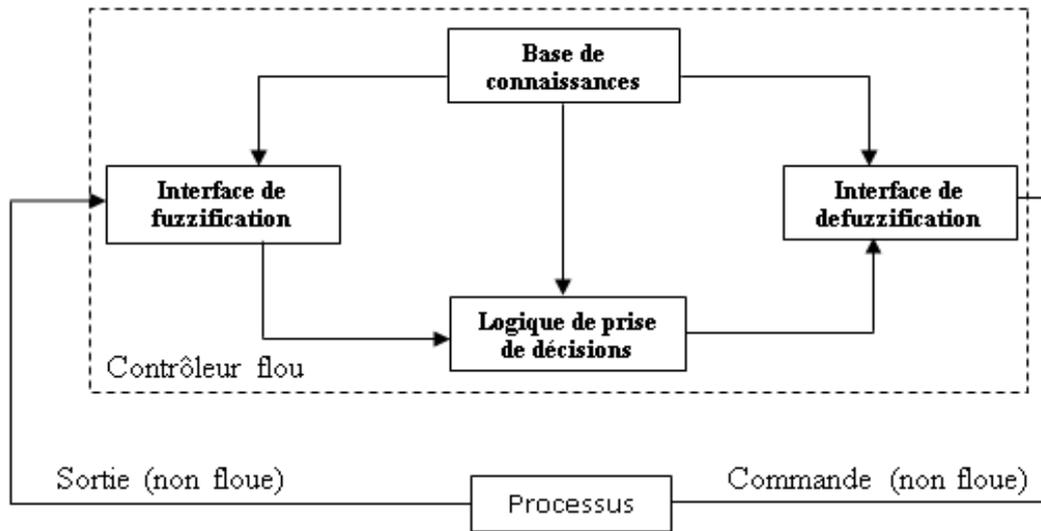


Figure II.4 : Structure de base d'un système de commande floue.

II.5.1. Interfaces de fuzzification

Dans les problèmes de commande, les grandeurs observées sont physiques (réelles), or le traitement de ces données est basé ici sur la théorie des ensembles flous. Pour cela une transformation de ces valeurs (numériques) en valeurs flous est nécessaire. La fuzzification consiste à relier le point numérique d'entrée $X = (x_1, x_2)$ aux sous-ensembles flous $A_{xi} = (A_{x1}, A_{x2})$ définis dans les univers associés aux variables linguistiques d'entrées.

A cet effet, deux méthodes de fuzzification existent :

- Représentation des valeurs floues par un sous-ensemble flou A_{xi} défini par :

$$\mu_{A_{xi}}(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = x' \\ \text{et décroît quand } x \text{ s'éloigne de } x' \end{cases}$$

- Représentation des valeurs floues par un singleton A défini par :

$$\mu_{A_{xi}}(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = x' \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

Où x' est une valeur numérique d'entrée. C'est un cas particulier du premier pour simplifier les calculs.[13]

II.5.2. Base de connaissance

Elle comprend toutes les connaissances concernant le domaine d'application et les buts de commande prévus, elle est composée de [10][14]:

a) Une base de données fournit les définitions nécessaires utilisées par les règles floues.

Ceci se résume en :

- ✓ une normalisation des univers de discours.
- ✓ Une partition floue des espaces entrées-sorties.
- ✓ Un choix des fonctions d'appartenances.

b) Une base de règles floues caractérisant la stratégie de la commande au moyen d'un ensemble de citations conditionnelles. Elle se résume en :

- ✓ choix de variables d'entrées
- ✓ source de règles floues de contrôle

II.5.3. Inférence floue

Effectuer des transformations à partir des sous-ensembles flous de l'espace d'entrée U , vers des sous-ensembles flous dans l'espace de sortie. Soit A_x un sous-ensemble arbitraire dans U . Chaque règle R_i détermine un sous-ensemble flou A_{x_0} R_i dont la fonction d'appartenance est déterminée par la règle compositionnelle.

$$u_{A_{x_0} R_i}(y) = \text{MaxMin}[u_{A_x}(x) \cdot U_R(X_1, X_2, y)] \quad (\text{II.8})$$

Où $x \in U$

$$u_{A_{x_0} R_i}(y) = \text{Max} [u_{A_x}(x) \cdot U_R(X_1, X_2, y)] \quad (\text{II.9})$$

Où $x \in U$

II.5.3.1. Définition des règles d'inférence

Pour certaines machines particulièrement complexes, seul l'expert sait réellement la piloter. Lui seul sait, après des années d'expérience, comment régler la machine. Il est impossible de donner des directives précises concernant l'établissement des règles. Cependant, ce n'est que si le comportement du système en boucle fermée n'est pas satisfaisant qu'il faut augmenter le nombre de règles et parfois le nombre de fonctions d'appartenance.[15]

II.5.3.2. Méthodes d'inférence

Après la partie précédente, nous savons calculer les relations de type

- Si ε est N et $\Delta\varepsilon$ est N.
- Si (ε est NON N et $\Delta\varepsilon$ est N) OU ε est P.

Il reste donc à définir une opération pour traduire le terme ALORS ainsi qu'une opération pour définir l'interaction entre les règles.

Il y a plusieurs méthodes d'inférence peuvent être utilisés, on cite par exemple max-min max-produit...

II.5.3.2.1.Méthode d'inférence max-min

Avec la méthode d'inférence max-min le mot ALORS est représenté par l'opération minimum de la valeur de la règle et de la fonction d'appartenance considérée de la sortie. Ainsi la règle : Si ε est P et $\Delta\varepsilon$ est Z ALORS u est P est traduite par la surface hachurée de la figure(II.5) qui représente la fonction d'appartenance partielle.

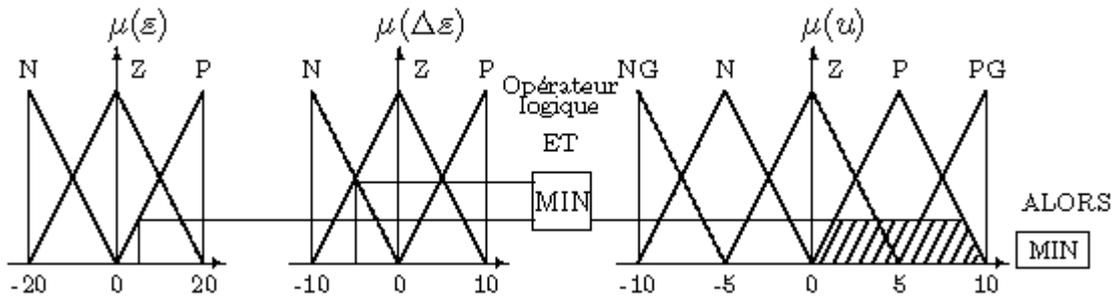


Figure II.5: Définition d'ALORS dans la méthode d'inférence max-min.

Par ailleurs l'interaction entre les règles sera nommée OU ainsi, on considère que les deux règles suivantes :

- Si ε est Z et $\Delta\varepsilon$ est N ALORS u est N
- Si ε est P et $\Delta\varepsilon$ est Z ALORS u est P

Se lisent :

- Si ε est Z et $\Delta\varepsilon$ est N ALORS u est N
- Si ε est P et $\Delta\varepsilon$ est Z ALORS u est P

Et ce OU se traduit par l'opération max. Nous obtenons ainsi la fonction d'appartenance résultante.

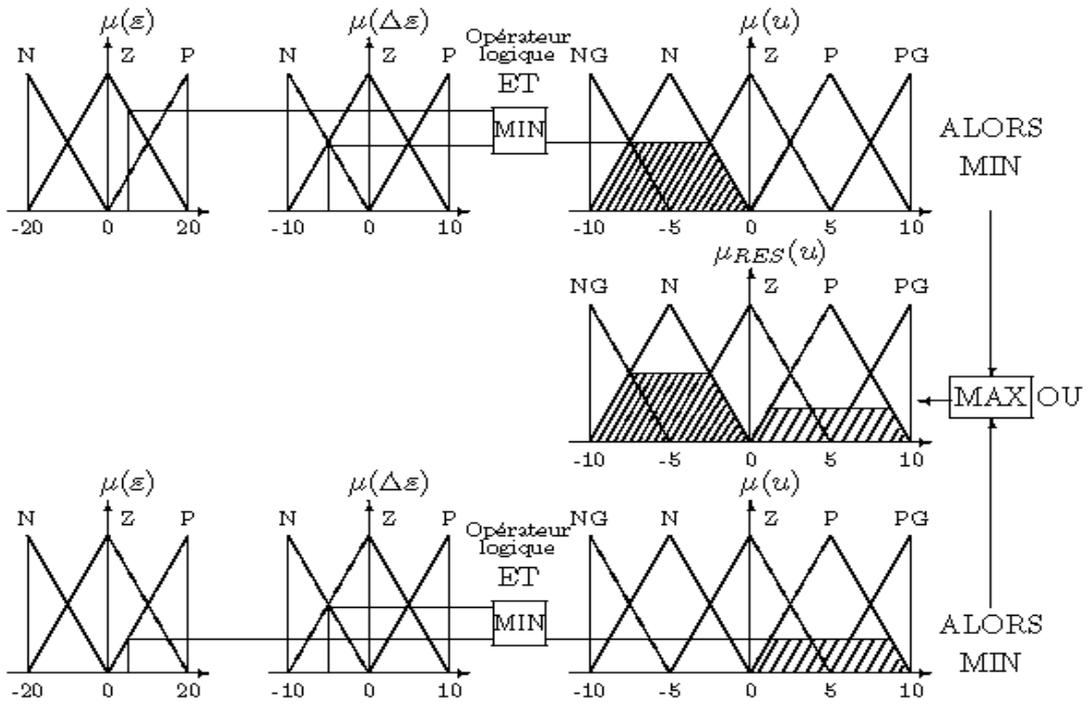


Figure II.6 : Définition de OU dans la méthode d'inférence max-min.

L'application de l'ensemble des règles donne la fonction d'appartenance partielle représentée sur la figure(II.7)

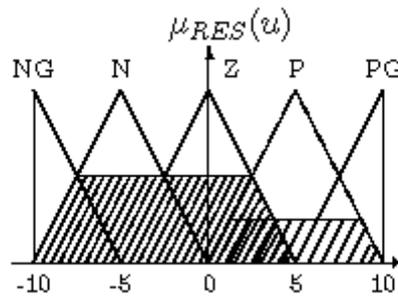


Figure II.7 : Fonction d'appartenance résultante.

II.5.3.2.2. Méthode d'inférence max-prod

La différence avec la méthode précédente est la réalisation d'ALORS qui se traduit par la multiplication de la fonction d'appartenance considérée par la valeur de la règle. Ce résultat est illustré sur la figure(II.8)

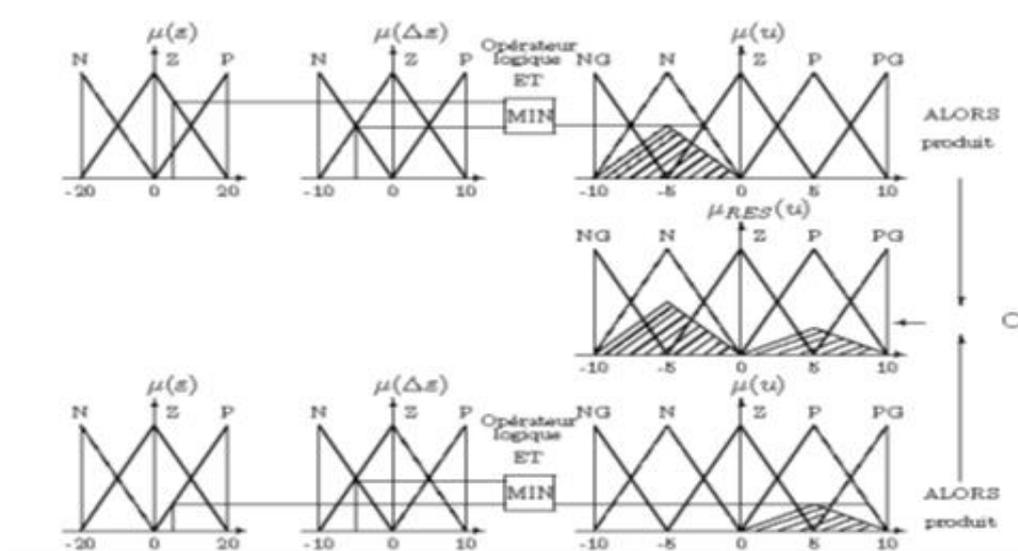


Figure II.8: Définition d'ALORS dans la méthode d'inférence max-prod.

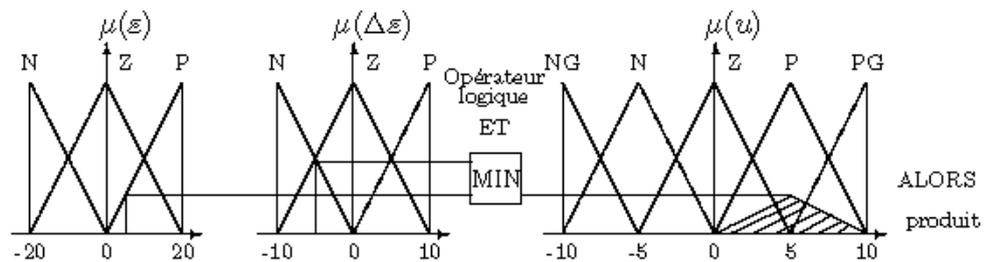


Figure II.9 : Définition de OU dans la méthode d'inférence max-prod.

II.5.3.2.3. Méthode d'inférence somme-prod

Cette méthode est proche de la méthode précédente, il suffit de remplacer la traduction de ALORS par la somme des fonctions d'appartenance partielles.

II.5.4. Interface de défuzzification

A travers le processus flou, plusieurs règles peuvent être activés avec des valeurs de vérités différentes. Comme l'entrée du système est une valeur numérique, il est nécessaire de transformer le sous-ensemble flou de sortie y, le point numérique y qui peut être considéré comme le plus représentatif de cet ensemble flou.[10][14]

Il existe plusieurs stratégies de défuzzification, les plus utilisées actuellement sont :

- Méthode de la moyenne de maximums.
- Méthode du centre de gravité.

II.5.4.1. Méthode de la moyenne de maximums

Cette stratégie génère une commande qui représente la valeur de toutes les actions de contrôle locale ayant des fonctions d'appartenances maximales plus particulièrement dans le cas d'un univers de discours discret, l'action de commande peut être exprimée par :

$$u_0 = \sum_{i=1}^{N_m} \frac{\omega_i}{N_m} \tag{II.10}$$

Ou : la valeur de la commande locale avec laquelle la fonction d'appartenance associée atteint la valeur maximale ω_i

N_m : est le nombre des maximas.

II.5.4.2. Méthode du centre gravité

La méthode la plus utilisée est de loin la méthode dite du centre de gravité. Il s'agit de calculer la position du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante, l'abscisse de ce centre de gravité devient la sortie du régulateur et donc la commande du système.

$$x_R^* = \frac{\int_A x_R(u_R(x_R)) dx_R}{\int_A u_R(x_R) dx_R} \tag{II.11}$$

Ou A : Espace flou de sortie.

Ce centre de gravité est relativement facile à calculer lorsque la fonction d'appartenance résultante est constituée de morceaux de droites. Dans les autres cas, ce calcul peut être gourmand en temps de calcul et donc pénalisant lors de l'implantation sur un microprocesseur. C'est l'une des raisons qui font préférer les fonctions d'appartenance de formes trapézoïdales (triangulaires) et les opérateurs logiques de type min-max.

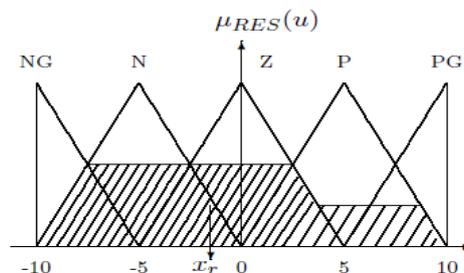


Figure II.10 : Défuzzification par la méthode du centre de gravité.

A noter que les valeurs extrêmes des sorties atteignables sont les centres de gravité des fonctions d'appartenance extrêmes des sorties. Aussi, et afin de minimiser le temps d'établissement, il faut choisir les fonctions d'appartenance des sorties maximales tels que leur centre de gravité corresponde aux valeurs maximales de commande.

II.6. Domaines d'applications de la logique floue

Parmi les nombreuses applications de la logique floue, la commande floue s'avère être le champ d'application le plus actif à travers le monde. Les domaines d'applications de la logique floue sont très nombreux. On la retrouve [13][16] :

- En automatique, pour faire de la commande et de la régulation floue, etc.
- En traitement du signal, pour faire de la fusion de données, de la classification, de la reconnaissance de forme ou de la recherche d'information, etc.
- En robotique, pour faire de la planification de trajectoire, etc.
- En traitement d'image, pour atténuer le bruit d'une image, pour faire de l'interpolation, etc.

On retrouve donc naturellement la logique floue dans de nombreux secteurs d'activités :

- Médecine (aide au diagnostic, guidage de systèmes chirurgicaux (laser chirurgie de l'œil par exemple, etc).
- Contrôle aérien.
- Gestions des feux de circulations.
- Assurances et finances (préventions des risques, aide à la décision).
- Environnement (météo, etc.).
- Robotique (freins ABS, machines à laver, etc.).
- etc.

II.7. Avantages et Inconvénients du réglage par logique floue

II.7.1. Avantages

- Pas de modèle mathématique requis pour le procédé à réguler.
- La théorie est simple et peut s'appliquer à des systèmes complexes.
- La commande floue est en général robuste.
- La commande peut facilement être auto-adaptative.
- La commande floue permet la capitalisation du savoir-faire.

- La commande floue conduit à un code informatique clair et lisible,

II.7.2. Inconvénients

- La technique de réglage est totalement empirique.
- Les performances dépendent directement de l'expertise.
- Il y a aucune démonstration possible, par exemple il est impossible de prouver la stabilité de la boucle.
- La possibilité d'apparition de cycles limites à cause du fonctionnement non linéaire.
- La cohérence des inférences non garantie à priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible).

II.8. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'application de la technique de commande par logique floue pour la commande de la machine à courant continu. Nous constatons que le choix convenable des paramètres de contrôleur flou (nombre des valeurs linguistique, fonctions d'appartenance et l'univers de discours) permet d'obtenir des meilleurs performances.

Finalement, on peut conclure que la caractéristique essentielle de cette technique est la bonne performance (elle s'approche du raisonnement humain : variables Linguistiques).

Cette dernière garantie une bonne insensibilité à la variation paramétrique du système à commander (robustesse de la commande vis à vis aux variations des paramètres).

CHAPITRE III

Applicaion de la commande floue sur MCC

III.1. Introduction

La machine à courant continu a généralement un enroulement en courant continu ou un ensemble d'aimants permanents sur le stator (le champ) et un enroulement connecté à des balais sur le rotor (l'induit). Les courants d'induit produisent une densité de flux maximale d'environ 90° par rapport au pic de densité de flux produit par le champ. Lorsque le rotor tourne, les courants dans les conducteurs d'induit sont commutés par un commutateur, de sorte que la configuration de champ reste la même. La machine à courant continu est par nature une machine à vitesse variable. La vitesse et le couple peuvent être contrôlés par le courant de champ et par la tension d'induit.

III.2. Moteurs à courant continue

III.2.1. Définition

Les moteurs à courant continu sont des composants de mouvement qui prennent le courant électrique sous forme de courant continu et le convertissent en rotation mécanique. Pour ce faire, les moteurs utilisent les champs magnétiques générés par les courants électriques pour stimuler la rotation d'un rotor fixé à un arbre de sortie. Le couple et la vitesse de sortie dépendent de l'entrée électrique et de la conception du moteur.

Un moteur à courant continu (Mcc) est une machine électrique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique.

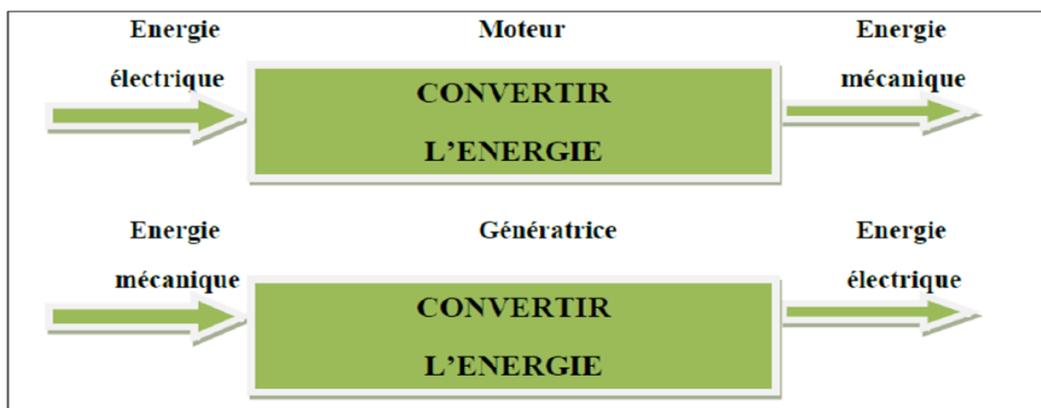


Figure III.1 : Fonctionnement de machine à courant continu.

III.2.2. Constitution

La machine à courant continu est constituée de trois parties principales :

- L'inducteur.
- L'induit.

- Le dispositif collecteur / balais.

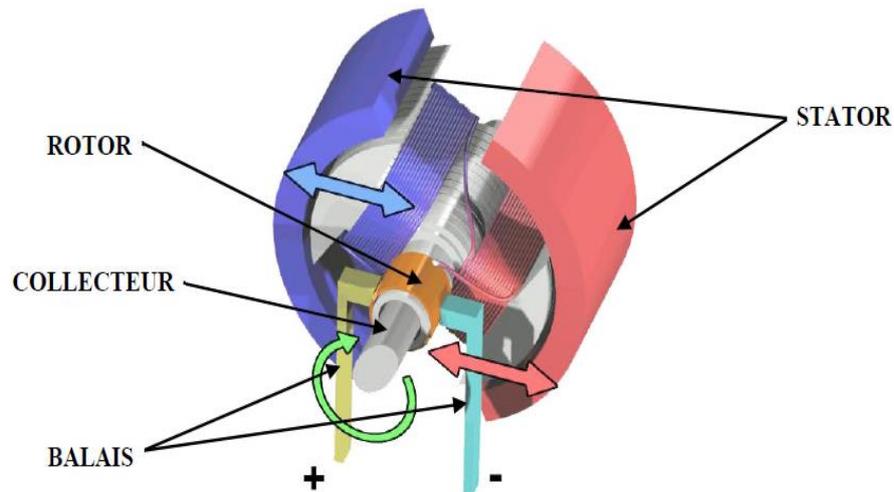


Figure III. 2 : Description d'un moteur à courant continu.

III.2.3. Différents types de moteur a courant continue

Il existe 4 types différents de moteurs électriques qui sont classés en fonction du type d'excitation qui est employé, qui sont :

- Le moteur à excitation shunt.
- Le moteur à excitation série.
- Le moteur à excitation composée.
- Le moteur à excitation séparée.

III.2.3.1. Moteur à excitation séparée

Le moteur à excitation indépendante est raccordé à une alimentation à courant continu séparée. Par conséquent, le courant qui alimente l'inducteur est indépendante de celui qui alimente l'induit.

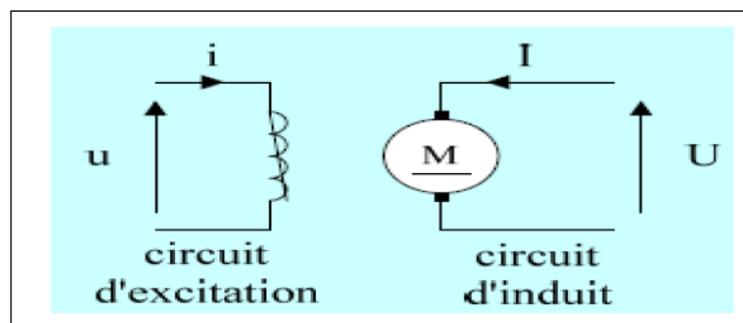


Figure III. 3 : Moteur à excitation séparée.

III.2.3.2. Moteur à excitation série

L'induit et l'inducteur sont alimentés par la même source de tension. Ce type de moteur présente un très fort couple au démarrage, il reste encore utilisé dans certaines applications de traction électrique.

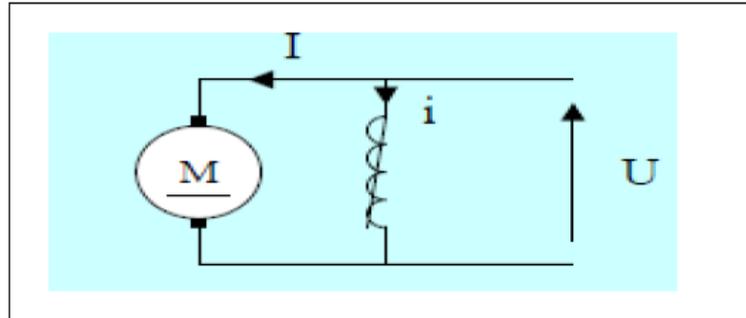


Figure III.4 : Moteur à excitation série.

III.2.3.3. Moteur à excitation shunt

La même source d'alimentation alimente l'induit et l'inducteur. L'inducteur est mis en parallèle avec l'induit. Ce mode d'excitation offre à l'utilisateur une fréquence de rotation pratiquement indépendante de la charge et qui peut démarrer à vide.

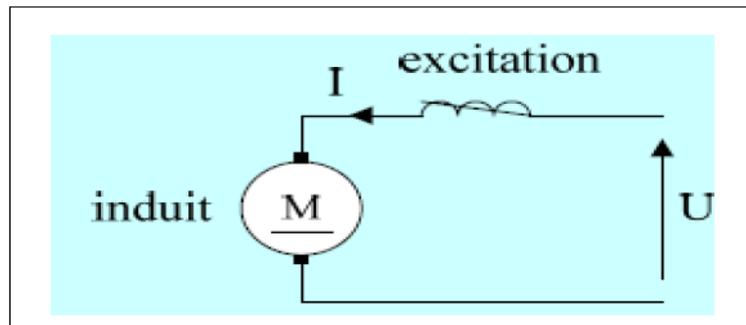


Figure III.5 : Moteur à excitation shunt.

III.2.3.4. Moteur à excitation composée

Le moteur à excitation composé, est à raccorder à avec deux excitations, excitation série et excitation shunt en même temps.

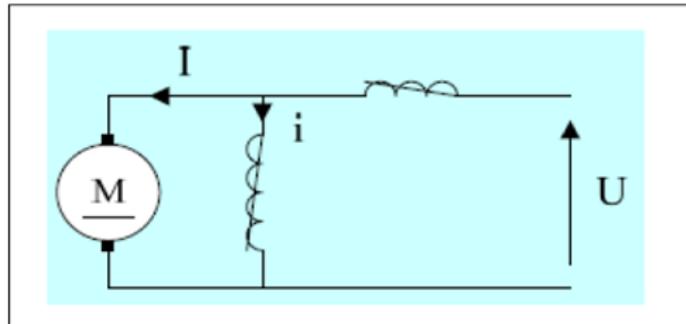


Figure III.6 : Moteur à excitation composée.

III.3. Avantage et les inconvénients du moteur à courant continu

III.3.1. Avantages des moteurs à courant continu

- Il est facile de contrôler la vitesse sur une plage étendue supérieure et inférieure à la vitesse nominale.
- Couple de démarrage élevé.
- Une vitesse moins élevée et précise avec un couple constant : Les entraînements à couple constant en sont un exemple. Ils ont un couple constant de l'arbre moteur sur une plage de vitesses donnée.
- Libre d'harmoniques, de consommation d'énergie réactive et de nombreux facteurs qui rendent les moteurs à courant continu plus avantageux que les moteurs à induction alternatifs.
- La plupart des moteurs de traction et des servomoteurs utilisent les moteurs à courant continu.
- Son utilisation est très confortable car ses dimensions permettent un gain de place considérable.

III.3.2. Inconvénients du moteur à courant continu

- Augmentation des coûts d'exploitation et de maintenance en raison de la présence du collecteur et de l'engrenage à brosse.
- Ne peut pas fonctionner dans des conditions explosives et dangereuses en raison de la formation d'étincelles à la brosse (risque d'échec de la commutation).
- Par rapport aux moteurs à courant alternatif, les moteurs à courant continu sont chers.

III.4. Modélisation

Un moteur à courant continu peut être décrit par la figure suivante, où U_d , U_f est la tension d'alimentation du partie(induit, inducteur), I_d est le courant d'induit, I_f est le courant d'inducteur, R_a, R_f est la résistance de l'induit et l'inducteur, L_a, L_f est l'inductance de l'induit et l'inducteur, E est la force électromotrice, ρ est le coefficient de frottement dans le moteur, ω est la vitesse angulaire du moteur et T_r est le couple exercé par le moteur sur la charge

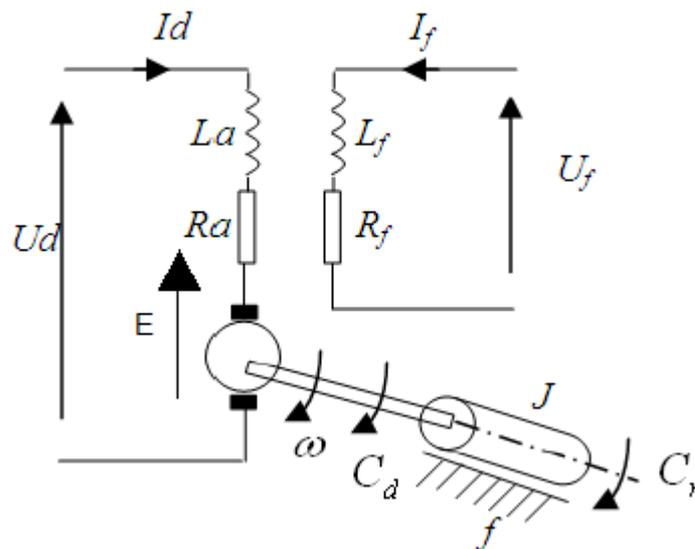


Figure III.7 : Moteur a courant continue a excitation séparé.

Selon le schéma ci-dessus un moteur électrique à courant continu est régit par les équations Physiques découlant de ses caractéristiques électriques, et mécaniques d'après la loi de Newton, combiné à des lois de Kirchhoff, on peut écrire les équations différentielles de premiers ordres suivantes :

$$u(t) = R_i(t) + L \frac{di}{dt} + e(t) \quad (\text{III.1})$$

Pour un fonctionnement stable, la commande est effectuée à couple moteur constant, donc à flux constant, la f.c.é.m. développée par la machine s'écrit :

$$e(t) = k_e \Omega \phi = k_e \Omega(t) \quad (\text{III.2})$$

L'équation de mouvement appliqué au système d'ensemble "moteur + charge mécanique" définit les limites de stabilité de l'entraînement on a :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = Cu - Cr \quad (\text{III.3})$$

$$Cu = k_c \cdot \dot{l}(t) - Cp \quad (\text{III.4})$$

$$Cr = f \cdot \Omega(t) \quad (\text{III.5})$$

III.4.1. Fonction de transfert du moteur

a. Equation électrique :

Par la transformé de la place :

$$U d(s) = E(S) + (R_a + l_a s)I(S) \quad (\text{III.6})$$

$$I(S) = \frac{U d(S) - E(S)}{R_a + L_a S} \quad (\text{III.7})$$

La fonction de transfert de la partie électrique est écrite comme suite :

$$H_{ELC}(S) = \frac{I(S)}{ud - E(S)} = \frac{\frac{1}{R_a}}{1 + \frac{L_a}{R_a} S} \quad (\text{III.8})$$

b. Equation mécanique :

$$Cu - Cr = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \quad (\text{III.09})$$

Après la transformation de Laplace :

$$\Omega(S) = \frac{Cu(S) - Cr(S)}{J(S) + f} \quad (\text{III.10})$$

La fonction de transfert de la partie mécanique est écrite comme suite :

$$H_{Mec}(S) = \frac{\Omega(S)}{Cu(S) - Cr(S)} = \frac{1}{J(S) + f} \quad (\text{III.11})$$

$$E = k \cdot \Omega \quad (\text{III.12})$$

$$Cu = k \cdot I \quad (\text{III.13})$$

$U(t)$: Tension appliquée au moteur
 $E(t)$: Force contre électromotrice
 $i(t)$: Intensité traversant le moteur
 C_r : Couple résistant
 $\Omega(t)$: Vitesse de rotation du rotor
 C_u : Couple moteur généré

f : Coefficient de frottement.
 J : Moment d'inertie de l'axe du rotor
 K_c : Constante de couple
 K_e : Constante de vitesse

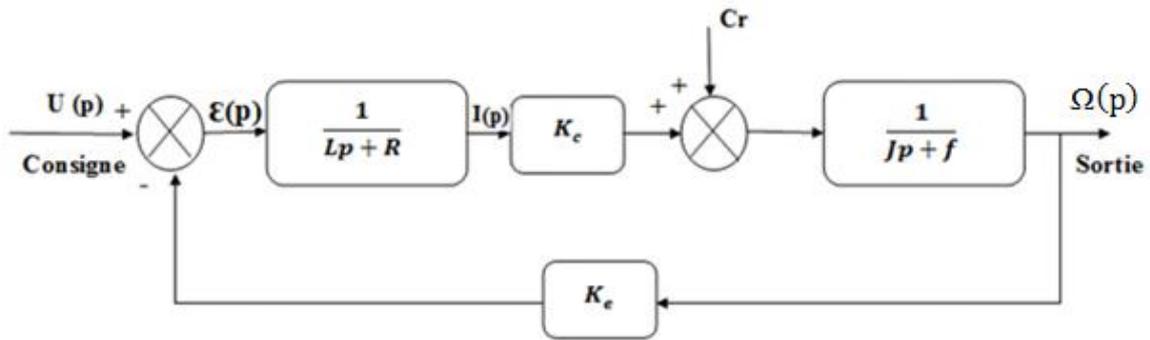


Figure III.8 : Schéma bloc du modèle de moteur électrique en vitesse.

III.5. Commande floue

Dans notre étude nous avons choisi un contrôleur à deux entrées (l'erreur et la dérivée de l'erreur) est une seule sortie (le courant id).

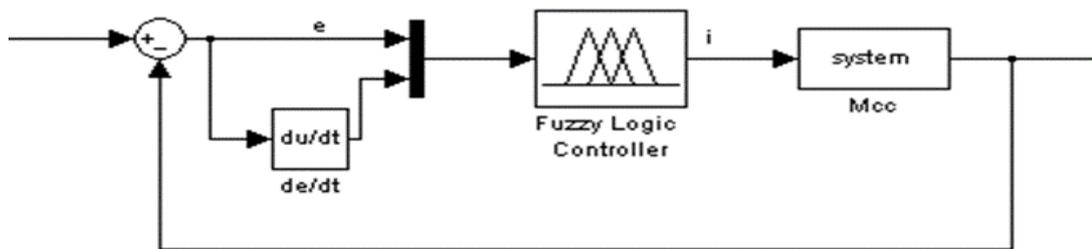


Figure III.9 : Structure de la commande floue.

III.5.1. Contrôleur

Le contrôleur flou utilisé est de type Mamdani avec trois variables linguistiques, deux pour l'entrée (l'erreur (e), la dérivée de l'erreur (de)) et une pour la sortie (courant id généré par le l'induit).

Pour chaque variable linguistique, nous avons choisi les valeurs linguistiques suivantes:

- GN** : grande négative
- MN** : moyen négative

PN : petite négative

Z : zéro

PP : petite positive

MP : moyen positive

GP : grande positive

III.5.2. Règle d'inférence

Les règles d'inférence utilisés est de type :

Si.....ALORS.

III.5.3. Fonctions d'appartenance

Dans notre étude nous avons essayé plusieurs fonctions d'appartenance

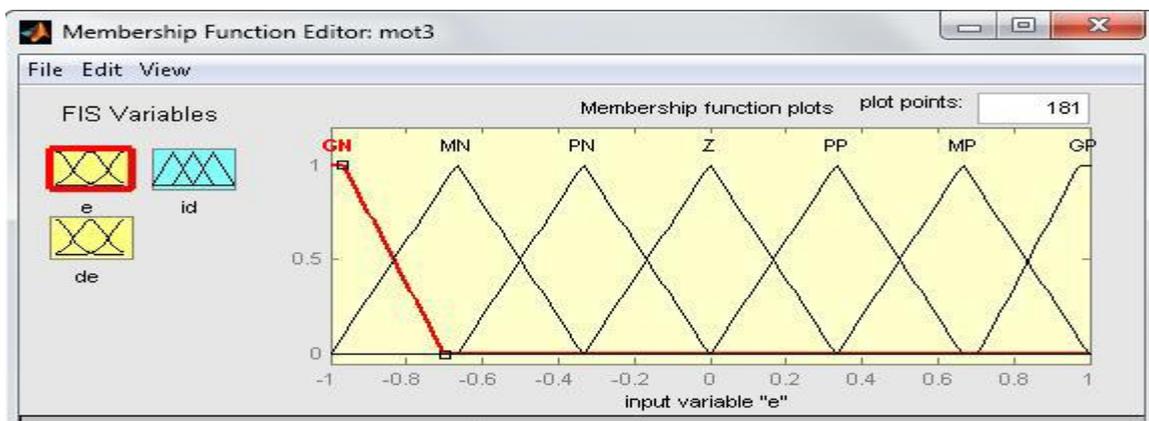


Figure III.10 : Fonction d'appartenance pour e (forme triangulaire).

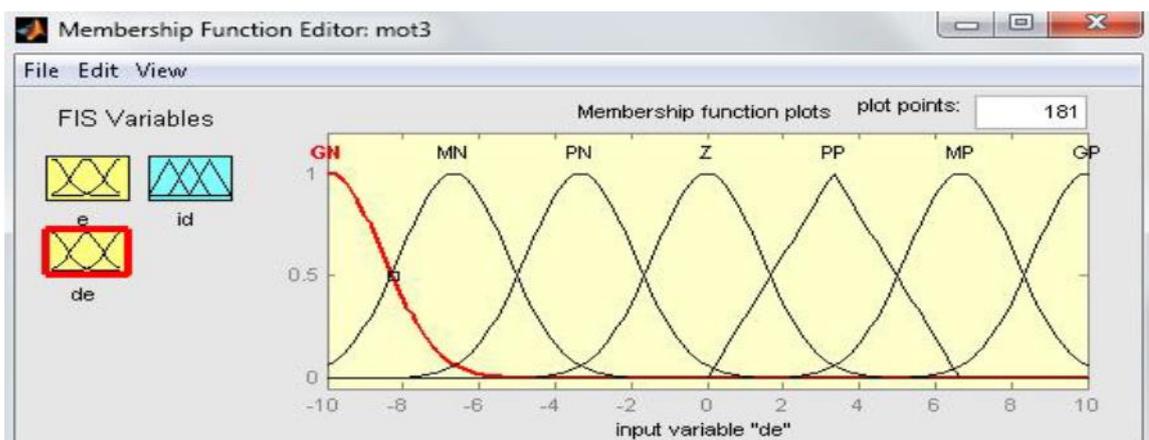


Figure III.11 : Fonction d'appartenance pour de (forme gaussienne).

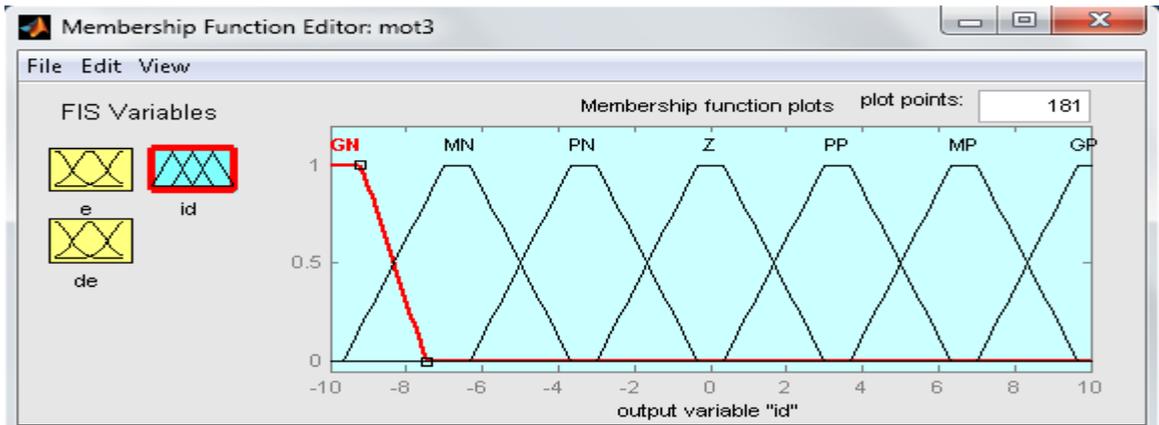


Figure III.12 : Fonction d'appartenance pour *id* (forme trapézoïdale).

III.6 Simulation

nous avons simulé le schéma bloc de la commande en vitesse d'un moteur à courant continu (voir annexe) qui est représenté par la figure III.13, Pour illustrer les performances de réglage par la logique floue.

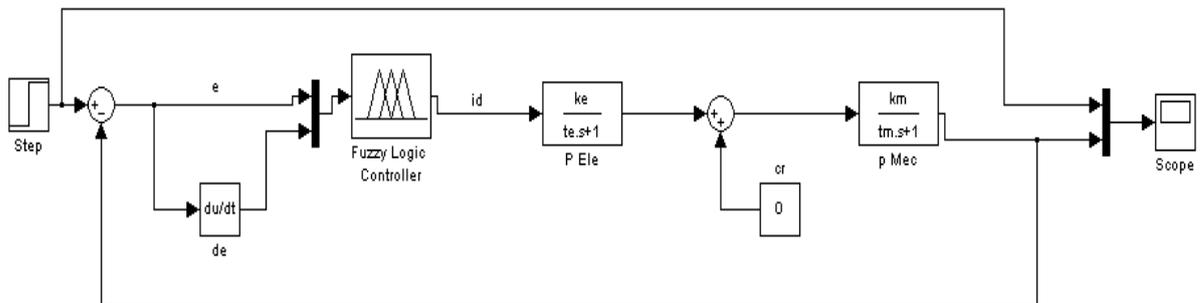


Figure III.13 : bloc de la commande en vitesse d'un moteur à courant continu par RLF

Afin de concevoir le contrôleur flou qui donne des meilleures performances, nous avons construit 3 contrôleurs flous de différentes valeurs linguistiques (7, 5 et 3 valeurs linguistique pour les deux entrées et la sortie, y compris les règles d'inférences qui correspondent) et différentes forme des fonctions d'appartenance:

✓ Contrôleur 1 (cas de 7 règles X 7 règles)

Tableau III.1 : Table des règles flou pour la sortie id (Contrôleur1).

e de	GN	MN	PN	Z	PP	MP	GP
GN	GN	GN	GN	GN	MN	PN	Z
MN	GN	GN	GN	MN	PN	Z	PP
PN	GN	GN	MN	PN	Z	PP	MP
Z	GN	MN	PN	Z	PP	MP	GP
PP	MN	PN	Z	PP	MP	GP	GP
MP	PN	Z	PP	MP	GP	GP	GP
GP	Z	PP	MP	GP	GP	GP	GP

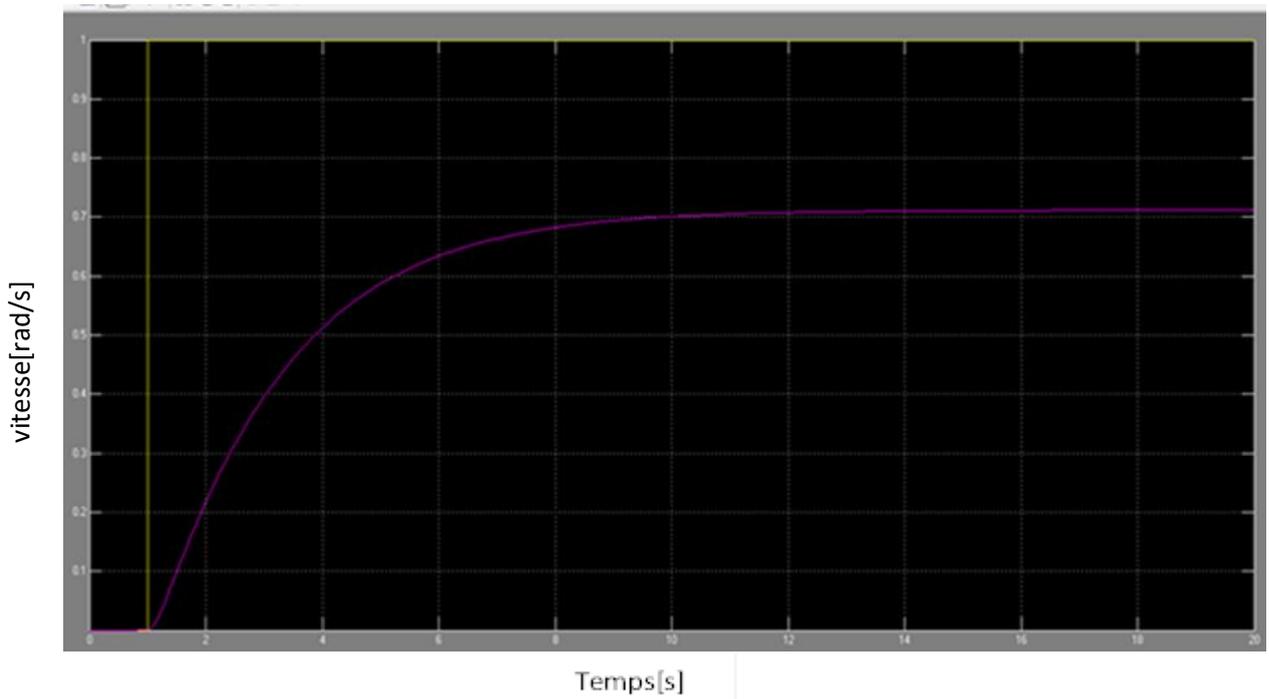


Figure III.14 : Réponse en échelon de la vitesse du moteur obtenu par le contrôleur flou 1.

✓ Contrôleur 2 (cas de 5 règles X 5 règles)

Tableau (III.2) : Table des règles flou pour la sortie id (Contrôleur2).

e \ de	GN	PN	Z	PP	GP
GN	GN	GN	GN	PN	Z
PN	GN	GN	PN	Z	PP
Z	GN	PN	Z	PP	GP
PP	PN	Z	PP	GP	GP
GP	Z	PP	GP	GP	GP

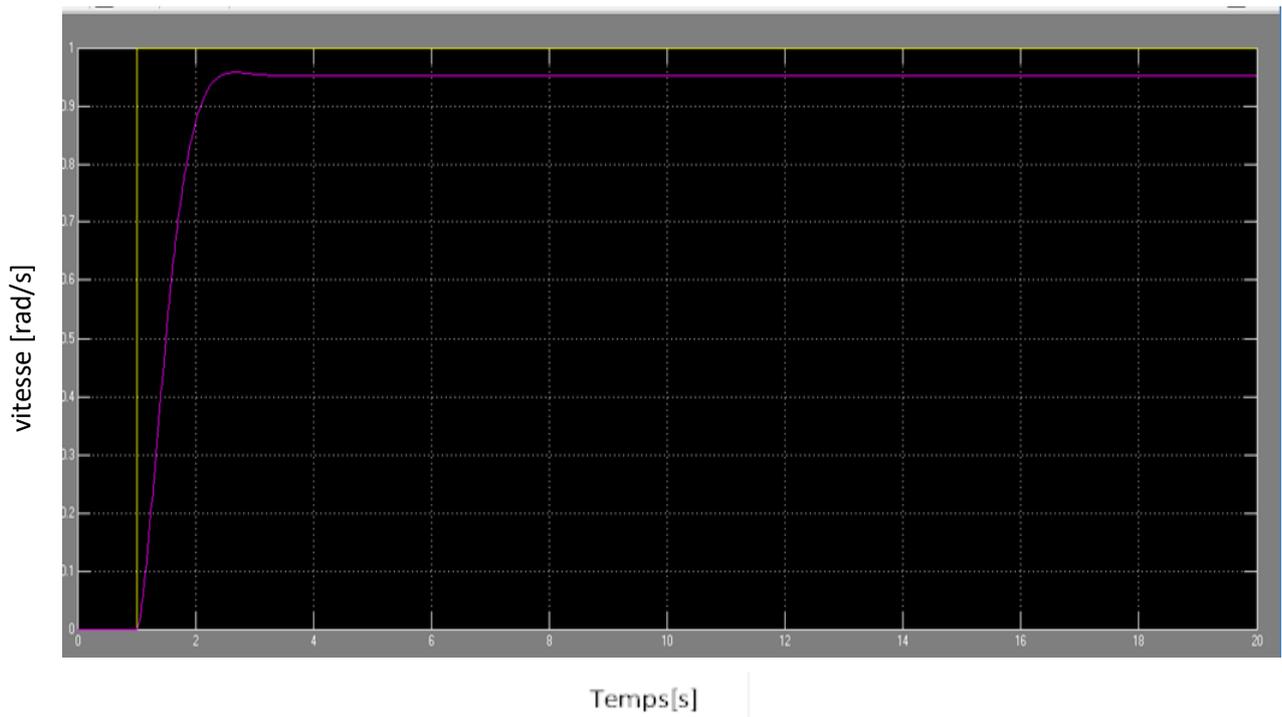


Figure III.15 : Réponse en échelon de la vitesse du moteur obtenu par le contrôleur flou 2.

✓ Contrôleur 3 (cas de 3 règles X 3 règles)

Tableau (III.3) : Table des règles floues pour la sortie id (Contrôleur3).

e \ de	GN	Z	GP
GN	GN	GN	Z
Z	GN	Z	GP
GP	Z	GP	GP

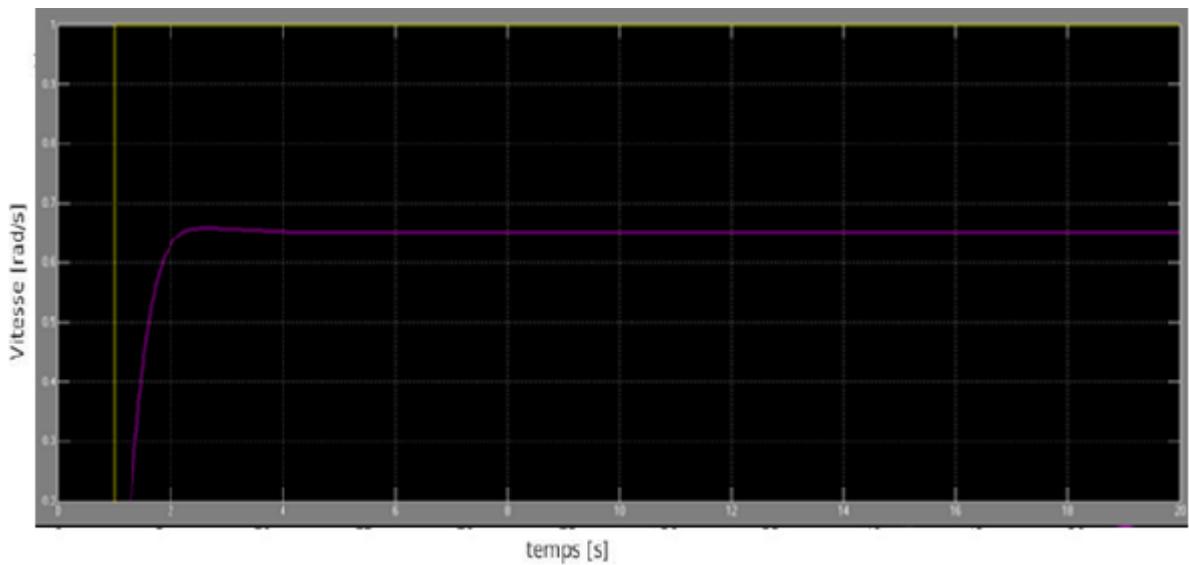


Figure III.16 : Réponse en échelon de la vitesse du moteur obtenu par le contrôleur flou 3.

Les performances obtenues par chaque contrôleur se résument dans le tableau III.4. D'après ce dernier, nous constatons que la réponse obtenu par le contrôleur 2 est très performant où le système est plus rapide et plus précis.

Tableau III.4: Table d'évaluation pour les performances de la réponse du système.

Contrôleur		1	2	3
Les performances				
Stabilité		stable	stable	stable
Précision		Non précis	précis	Non précis
Rapidité		lent	Rapide	lent

III.6.1. Robustesse du contrôleur flou

Dans cette partie, nous avons utilisé un modèle incertain du moteur pour évaluer la robustesse du contrôleur flou vis-à-vis aux variations des paramètres. La figure III.17 présente la réponse en échelon pour différentes valeurs de constante électrique t_e et constante mécanique t_m . D'après cette figure nous constatons que le contrôleur flou permet d'imposer les mêmes performances malgré la présence des variations des paramètres des moteurs surtout l'inertie du moteur et l'inertie de la charge.

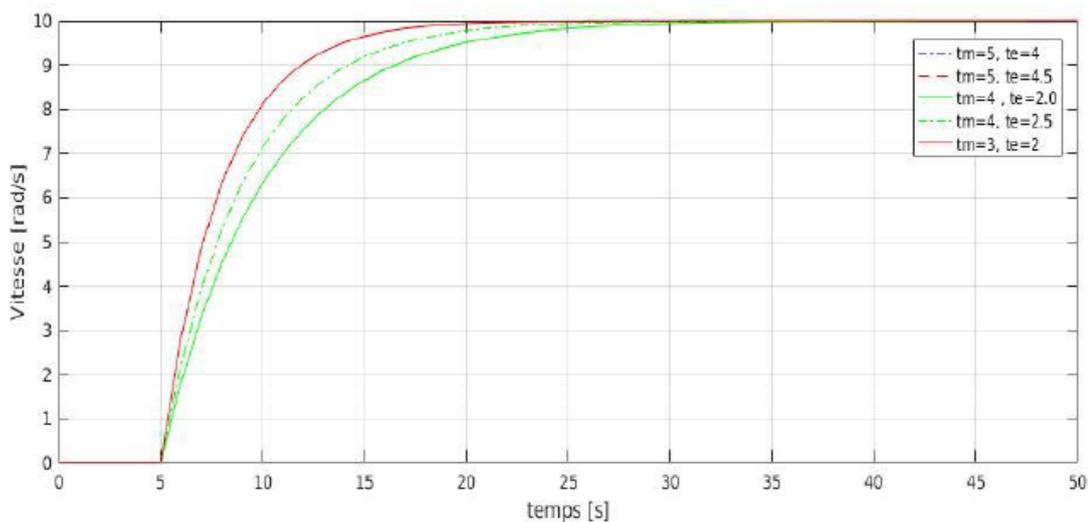


Figure III.17 : Réponse en échelon avec variations des paramètres 'constantes de temps t_m et t_e '.

La figure III.18 présente la réponse en échelon pour différentes valeurs du gain statique. D'après cette figure, nous constatons que pour une variation de $\pm 10\%$, les réponses du système (vitesse du moteur) obtenu par le contrôleur flou possèdent les mêmes performances. Pour des grandes variations nous obtenons des réponses de mêmes temps de réponse avec une petite différence d'erreur.

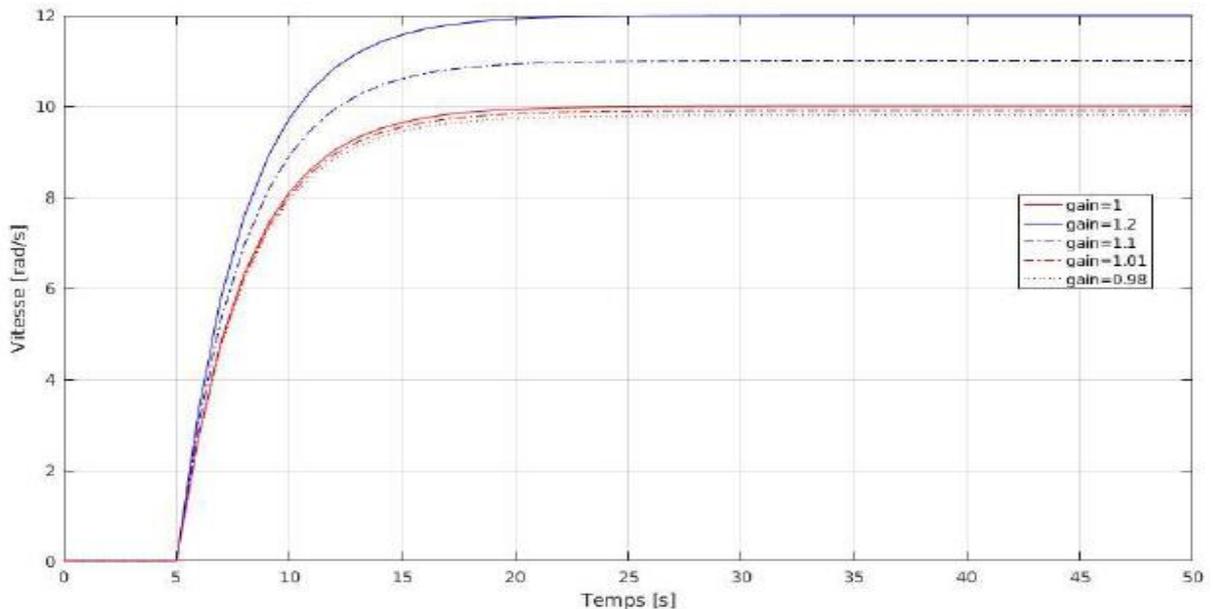


Figure (III.18) : Réponse en échelon avec variations des paramètres 'gain'.

III.7. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'application de la technique de commande par logique floue pour la commande de la machine à courant continu. Nous constatons que le choix convenable des paramètres de contrôleur flou (nombre des valeurs linguistique, fonctions d'appartenance et l'univers de discours) permet d'obtenir des meilleures performances.

Finalement, on peut conclure que la caractéristique essentielle de cette technique est la bonne performance (elle s'approche du raisonnement humain : variables Linguistiques).

Cette dernière garantit une bonne insensibilité à la variation paramétrique du système à commander (robustesse de la commande vis à vis aux variations des paramètres).

L'ensemble de travail exposé dans ce mémoire donne comme but la commande de la vitesse d'un moteur à courant continu à excitation séparé par logique floue.

Après avoir donné quelque rappel théorique de base de la commande classique PID, il est important de noter que ce type de régulation est limité par un certain nombre de contraintes.

Dans ce cas Il faut penser de concevoir des nouveaux contrôleurs avancés. Le command flou est la plus actif à travers le monde grâce à sa simplicité. Les résultats de simulation qui nous obtient ont illustré l'efficacité de la commande par logique floue à travers les caractéristiques de la réponse. ce type de régulateur, possède un meilleur temps de monté, une réponse rapide. Les différents résultats obtenus de simulation montrent la robustesse du contrôleur floue.

A partir des résultats de la simulation, nous avons trouvé qu'il est possible d'obtenir de très bonnes performances. Les régulateurs flous en général, n'imposent pas la connaissance détaillée du modèle du système à commander, ils se contentent souvent de son comportement entrée/sortie.

En dernier et durant ce travail qui nous a été très fructueux, nous avons mis en œuvre les connaissances acquises durant notre formation que ce soit sur le plan théorique que pratique comme il nous a appris à travailler en équipe pour une meilleure maîtrise et un aboutissement certain du sujet.

- [1] <http://engineering.ju.edu.jo/Laboratories/07-PID%20Controller.pdf> 1
- [2] <https://www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds101/fa02/caltech/astrom-ch6.pdf>
- [3] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me>
- [4] <https://ft.univ-setif.dz/externe/divers/Module-sysasservi.pdf>
- [5] https://www.academia.edu/.../Asservissement_des_systèmes_linéaires_à_temps_continu...
- [6] projet.eu.org/pedago/sin/term/6-asservissement_PID.pdf
- [7] <http://www.acsysteme.com/fr/pid-serie-ou-parallele>
- [8] www.univ-bejaia.dz/.../Etude%20comparative%20des%20régulateurs%20PID%20et%...
- [9] B. Deforge & Q. David, Asservissement en position d'un axe linéaire. Projet d'automatique 2008.
- [10] BERNADETTE BOUCHON-MEUNIER, La logique floue et ses applications. Edition Addison-Wesley France SA 1995.
- [11] J.Godjevac, Idées nettes sur la logique floue. Presse polytechnique et universitaire romande Lausanne 1999.
- [12] P Borne, J.Roziner, J.Y dieulot, L .Dubois, Introduction à la commande floue. Edition Technip, paris 1998.
- [13] Alain Bonardi & Isis Truck, Une introduction à la logique floue, pour une approche prospective pour la visualisation du son. Séminaire IARM, Université Paris8 2006.
- [14] A. KERKOUR & R. CHIBAN, Coordination des régulateurs de vitesse et de tension à base de logique floue pour l'amélioration la stabilité transitoire des réseaux électriques. Projet de fin d'étude, université de Béjaia 2000.
- [15] Gonzalo Cabodevila, Commande et Identification Floue. École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques France 2007.
- [16] François CHEVRIE & François GUÉLY, La logique floue Cahier Technique Schneider n° 191 Edition mars 1998.

Les paramètres du MCC

Tension nominale	$U_{nom}=24 \text{ V}$
Tension Maximal	$U_{max}=32 \text{ V}$
Courant permanat	$I_{max} = 2.2 \text{ A}$
Résistance aux born	$R=1.91 \Omega$
Constante ce couple	$K_c=60.3 \text{ mNm.A}^{-1}$
Constante de vitesse	$K_e =60.3 \text{ mNm.A}^{-1}$
Inductance	$L= 0.63 \text{ mH}$
Moment d'inertie rapporté au rortor	$J= 10^{-4} \text{ Kg.m}^2$
Coeficient de frottemnt visqueux	$F=2.5 * 10^{-6}$