

Centre Universitaire BOUSSOUF Abdelhafid -Mila

Institut des Sciences et Technologie

Département de Génie Mécanique et Électromécanique



N°Ref :

**Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme
de MASTER**

Spécialité : ELECTROMECHANIQUE

**Etude Comparative en Simulation entre un
Régulateur PID Classique et un Régulateur PID
Intelligent**

Réalisé par :

- **BOUGHERZA ABDELMALEK**
- **MIMOUNE MEROUAN**

Soutenu devant le jury :

M. Bouhennache Rafik

Président

Mme. Beneunia Meriem

Examineur

Mme. Yessad Dalila

Promoteur

Année universitaire : 2021/2022

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail à :

En premier lieu ceux que personne ne peut compenser les sacrifices qu'ils ont consentis pour notre éducation et notre bien-être à nos parents qui se sont sacrifiés pour nous prendre en charge tout au long de notre formation et qui sont l'origine de notre réussite que dieu les garde et les protège.

A notre famille et nos chers amis qui nous ont accordé leur soutien dans les instants les plus difficiles.

Toute personne qui de près ou de loin a participé à notre formation.

Remerciements

Tout d'abord nous remercions dieu tout puissant qui nous a gardé en bonne santé afin de faire ce modeste travail et qui nous a permis de vivre ce bonheur.

Tout nos vifs remerciements vont vers notre promotrice M^{me} Yessad.D pour ses conseils chaleureux, son encadrement, sa disponibilité et son aide précieuse pour réaliser ce modeste travail, pour cela on l'assure de notre sincère gratitude et notre respect le plus profond.

Nous remercions les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre modeste travail.

Merci à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce projet.

Nomenclature

Symboles	Désignation
$H(p)$	fonction de transfert
$Y(t)$	La mesure de la variable à réguler
K	gain statique
τ	constante du temps.
m	coefficient d'amortissement
ω_0	pulsation propre non amortie
k_p	Action proportionnelle
k_d	Action dérivée
k_i	Action intégrale
Sup	Supérieur
Min	Minimum
PID	Proportionnelle Intégral Dérivé
V_a	la tension d'induit (Volt)
θ	la vitesse de rotation
E_b	force contre électromotrice (Volt)
I_a	Le courant d'induit (Ampère)
R_a	la résistance d'induit (Ohm)
L_a	l'inductance d'induit (Henry)
T_m	le couple mécanique développé (Nm)
J_m	le moment d'inertie (Kg/m ²) (rad/sec)
B_m	le coefficient de frottement du moteur (Nms)
ω	la vitesse angulaire

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES SYSTEMES ASSERVIS

I.1 Introduction.....	2
I.2 Notion de système.....	2
I.3 L'asservissement.....	2
I.4 La Régulation	3
I.4.1 Éléments constitutifs d'une boucle de régulation.....	6
I.4.2 Types de régulation industrielle.....	7
I.5 Systèmes élémentaires	7
I.5.1 Système du premier ordre	7
I.5.2 Système du second ordre.....	8
I.6 Critères de performance d'une régulation	9
I.6.1 Stabilité	9
I.6.2 Rapidité	9
I.6.3 Précision.....	10
I.7 Conclusion	11

CHAPITRE II: LES REGULATEURS PID

II.1 Introduction	12
II.2 Le régulateur PID	12
II.2.1 Définition.....	12
II.2.2 Description des régulateurs PID	13
II.2.3 Types de contrôleurs.....	13
II.2.4 Correcteur proportionnel (P) :	14
II.2.5 Correcteur proportionnel – intégrale (PI)	14
II.2.6 Correcteur proportionnel – dérivée (PD).....	15
II.2.7 Correcteur proportionnel - intégrale – dérivée	16

II.2.7.1 Synthèse du régulateur PID	17
II.2.7.1.1 Les différentes structures du PID	17
II.2.7.2 Rôle des actions dans la boucle fermée	18
II.2.7.2.1 Rôle de l'action proportionnelle	18
II.2.7.2.2 Rôle de l'action Intégrale	19
II.2.7.2.3 Rôle de l'action dérivée	20
II.3 Méthodes de réglage des actions	21
II.3.1 Réglage à partir de l'identification du procédé	21
II.3.1.1 Cas d'un procédé stable	22
II.3.2 Réglage par la méthode de Ziegler et Nichols	23
II.3.2.1 Mode opératoire	24
II.3.2.2 Calcul des actions	24
II.4 Schéma bloc	25
II.5 Conclusion	26

CHAPITRE III :LA LOGIQUE FLOUE

III.1 Introduction	27
III.1.1 Définition	27
III.1.2 Comparaison : la logique floue et logique classique	28
III.2 La théorie des sous-ensembles flous	28
III.2.1 Définition d'un sous-ensemble flou	28
III.2.2 Caractéristiques d'un sous-ensemble flou	29
III.2.3 Opérations sur les sous-ensembles flous	30
III.2.4 Principe d'extension de Zadeh	33
III.3 La commande floue	34
III.3.1 première étape : la fuzzification	34
III.3.2 La deuxième étape : le mécanisme d'inférence	35

III.3.3 La troisième étape : la défuzzification	36
III.4 Conclusion	37

CHAPITRE IV : SIMULATION ET RESULTATS

IV.1 Introduction.....	38
IV.2. Système de 1 ^{er} ordre	38
IV.2.1 Étude le système avec le contrôleur PID.....	38
IV.2.2 Étude le système avec le contrôleur FLOU.....	39
IV.2.3 Comparaison entre les deux régulateurs	41
IV.3 Système de 2 ^{ème} ordre : Contrôle de la vitesse d'un moteur à courant continu ..	43
IV.3.1 Modélisation du Système d'un moteur à courant continu	45
IV.3.2 Étude le système avec le contrôleur PID.....	45
IV.3.3 Étude le système avec la commande floue.....	45
IV.3.4 Comparaison entre les deux régulateurs	48
IV.4. Système de 3 ^{ème} ordre.....	49
IV.4.1 Étude le système avec le contrôleur PID.....	49
IV.4.2 Étude le système avec le contrôleur flou.....	50
IV.4.3 Comparaison entre les deux régulateurs	53
IV.5. Conclusion	54
CONCLUSION GENERALE	56

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE

Liste des figures

Liste des figures de chapitre I

Figure I.1 : Modèle général d'un système	2
Figure I.2 : Asservissement de la température d'une pièce	3
Figure I.3 : la boucle de régulation de base	4
Figure I.4 : Schéma de principe de fonctionnement d'une régulation	5
Figure I.5 : Régulation de température d'un échangeur thermique	5
Figure I.6: Capteur élément de la chaine de régulation	6
Figure I.7 : Réponse indicielle d'un système du 1er ordre	8
Figure I.8 : Systèmes instables dont la sortie diverge ou oscille sans se stabiliser	9
Figure I.9 : Systèmes stables dont les sorties convergent vers une valeur	9
Figure I.10 : Caractérisation de la rapidité d'un système par le temps de réponse à 5%	10
Figure I.11 : Caractéristique de la précision d'un système	10

Liste des figures de chapitre II

Figure II.1 : Asservissement par un régulateur PID	13
Figure II.2 : Commande proportionnelle P	14
Figure II.3 : Commande proportionnelle-intégrale PI	15
Figure II.4 : Commande proportionnelle-dérivée PD	16
Figure II.5 : Commande PID	16
Figure II.6 : Rôle de l'action proportionnelle	19
Figure II.7 : Rôle de l'action intégral	20
Figure II.8 : Rôle de l'action dérivée	21
Figure II.9 : Courbes des GR et BP%	24
Figure II.10 : Schéma bloc du système de 3ème ordre commandé par les différentes structures de PID	25
Figure II.11 : La réponse du système de 3eme ordre commandé par PID	25
Figure II.12 : Réponse d'un système avec tous les autres régulateurs	26

Liste des figures de chapitre III

Figure III.1 : Sous-ensemble classique de U	29
Figure III.2 : Caractéristiques d'un ensemble flou	30
Figure III.3 : Ensembles flous liés à la taille d'un homme	31
Figure III.4 : Intersection des sous-ensembles « petit » et « moyen »	31
Figure III.5 : Union des sous-ensembles « petit » et « moyen »	32
Figure III.6 : Principe d'extension de Zadeh	33
Figure III.7 : Image d'un sous-ensemble ordinaire	34
Figure III.8 : Partition de l'univers liée à la taille d'un homme	34
Figure III.9 : Inférence de Mamdani : étapes de l'agrégation et de l'activation	36
Figure III.10 : Inférence de Mamdani étape de l'agrégation des conclusions	36

Liste des figures de chapitre IV

Figure. IV.1: Schéma bloc du système de 1 ^{ier} ordre régulé par un PID	38
Figure. IV.2: La réponse du système de 1 ^{ier} ordre commandé par PID	38
Figure. IV.3: Schéma bloc du système de 1 ^{ier} ordre régulé par un régulateur flou	39
Figure. IV.4: Fuzzification de l'entrée du contrôleur flou	39
Figure. IV.5: Fuzzification de la sortie du contrôleur flou	40
Figure. IV.6: La réponse du système de 1 ^{ier} ordre commandé par un régulateur flou	41
Figure. IV.7: Schéma bloc de système du 1 ^{ier} ordre commandé par le PID et le contrôleur flou	41
Figure. IV.8: La réponse du système du 1 ^{ier} ordre	42
Figure. IV.9 : Schéma équivalent d'un moteur à courant continu	43
Figure. IV.10: Schéma bloc du système de 2 ^{ème} ordre régulé par un PID	45
Figure. IV.11: Réponse indicielle du système de 2 ^{ème} ordre régulé par un PID	45
Figure. IV.12: Schéma bloc de système de 2 ^{ème} ordre commandé par le contrôleur flou ...	46

Figure. IV.13: Fuzzification de l'erreur du contrôleur flou	46
Figure. IV.14: Fuzzification de la dérive d'erreur du contrôleur flou	46
Figure. IV.15: Fuzzification de la commande du contrôleur flou	47
Figure. IV.13: Réponse indicielle du système avec régulateur flou	48
Figure. IV.14: Schéma bloc de système du 2 ^{ème} ordre commandé par le PID et le contrôleur flou	48
Figure. IV.15: La réponse système du 2 ^{ème} ordre.....	49
Figure. IV.16: Schéma bloc du système de 3 ^{ème} ordre régulé par un PID	50
Figure. IV.17: La réponse du système de 3 ^{ème} ordre commandé par PID	50
Figure. IV.18: Schéma bloc de système de 3 ^{ème} ordre commandé par le contrôleur flou ...	51
Figure. IV.19: Fuzzification de l'erreur du contrôleur flou	51
Figure. IV.20: Fuzzification de la dérive d'erreur du contrôleur flou	51
Figure. IV.21: Fuzzification de la commande du contrôleur flou	52
Figure. IV.22: La réponse système du 3 ^{ème} ordre commandé par le contrôleur flou	53
Figure. IV.23: Schéma bloc de système du 3 ^{ème} ordre commandé par le PID et le contrôleur flou	53
Figure. IV.24: La réponse système du 3 ^{ème} ordre.....	54

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Les différentes structures du PID	17
Tableau II.2:Tableau des différents régulation cas d'un procédé stable.....	23
Tableau II.3 : Tableau des différents régulation cas de réglage Ziegler et Nichols.	24
Tableau IV.1: Résultat d'un système de 1 ^{er} ordre	42
Tableau IV.2 : Tableau des règles de la logique floue utilisés pour la conception du régulateur flou.....	47
Tableau IV.3: Résultat d'un système de 2 ^{ème} ordre	49
Tableau IV.4 : Tableau des règles floues du contrôleur flou	52
Tableau IV.5: Résultat d'un système de 3 ^{ème} ordre	54

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La régulation industrielle est l'un des éléments les plus importants du monde industriel. Comme la régulation se caractérise par l'obtention des meilleurs résultats dans le système de production. Les nombreux besoins constatés dans le monde ont conduit au développement de la production industrielle, faisant des spécialistes de ce domaine de la régulation un sujet d'étude et de recherche.

Elle a pour fondements théoriques les mathématiques, la théorie du signal et l'informatique théorique. L'automatique permet l'automatisation de différentes tâches de fonctionnement des machines et des chaînes industrielles. On parle alors de système asservi ou régulé, Dans la plupart des processus industriels, en particulier les moteurs électriques, il est indispensable de maîtriser certains paramètres physiques (vitesse, position, angle...etc.), il est donc très souvent nécessaire d'avoir recours à une commande.

L'objectif de notre thème est d'implémenter deux types de commande : une commande PID et une autre dite logique floue sur plusieurs systèmes afin de comparer les résultats et les performances de chacune.

Notre travail est présenté dans un mémoire organisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons les notions de base des systèmes linéaires et les critères de performance d'un système,

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons des généralités sur le régulateur PID, ses aspects fonctionnels, les différents types des régulateurs P, PI, PID, leurs principe de fonctionnement, leurs avantages et inconvénients puis nous citons les différentes méthodes de synthèse d'un régulateur PID parmi les méthodes nous avons cité la méthode de Ziegler-Nichols .

Le troisième chapitre nous décrivons les principes de base de la logique floue. Nous introduisons la théorie des ensembles flous ainsi que les différents contrôleurs flous, et leurs caractéristiques.

Dans le dernier chapitre, nous présentons notre travail de simulation où on a utilisé les deux régulateurs présentés précédemment (contrôleur PID, contrôleur flou) pour la régulation de quelques systèmes en 1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème} ordre.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale résumant les différents résultats obtenus que nous allons obtenir dans notre travail.

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LES SYSTEME ASSERVIS

I.1 Introduction

Depuis la nuit des temps l'homme a cherché des moyens mécaniques susceptibles de l'aider, voir même de le remplacer pour accomplir certaines tâches pénibles. Cette envie de se faire remplacer par des machines a donné naissance à une discipline qui est l'automatique. Le développement que connaît cette dernière lui permet d'occuper une place importante dans le monde moderne, la recherche des performances, la conception et la construction des appareils de plus en plus complexes et d'une grande crédibilité, permettent d'analyser les systèmes et d'optimiser leurs fonctionnements et le moyen de concevoir comment fonctionnent ces systèmes constitue un intérêt majeur dans le monde de l'industrie.

I.2 Notion de système

En automatique, on appelle système ou processus l'objet à étudier. La définition d'un système est liée aux grandeurs d'entrée et de sortie considérées. Il 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. 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 et perturbations. 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.

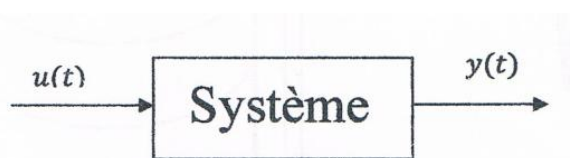


Figure I.1 : Modèle général d'un système.

I.3 L'asservissement

L'asservissement est une partie de l'automatique. L'objet principal de l'asservissement est d'élaborer la commande d'un procédé afin de lui faire atteindre une grandeur physique déterminée. Un système asservi est un système qui prend en compte, durant son fonctionnement, l'évolution de ses sorties pour les modifier et les maintenir conforme à une consigne.

Exemple : asservissement de la température d'une pièce, on obtient le schéma de principe décrit par la Figure 1.2 suivante :

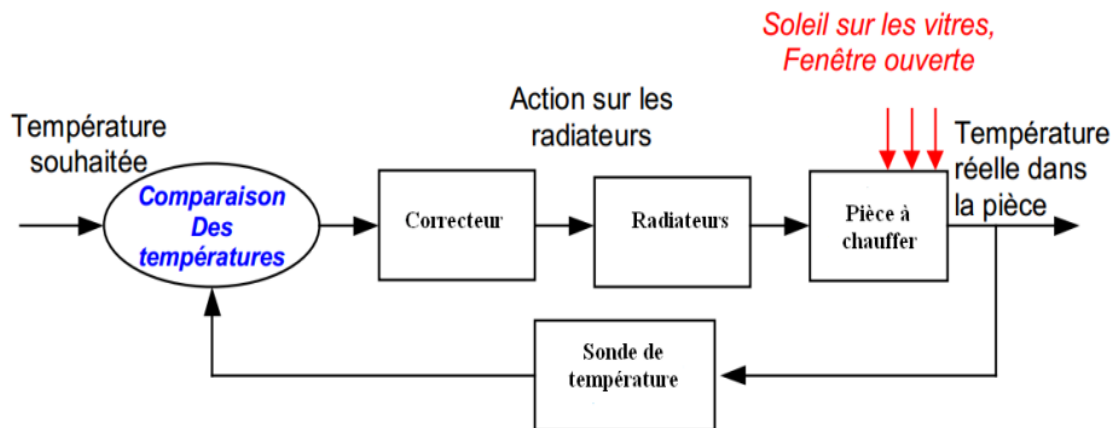


Figure I.2 : Asservissement de la température d'une pièce.

La température souhaitée représente la consigne (fixée par l'utilisateur) est comparée à la valeur mesurée par la sonde de température (thermomètre). Le correcteur délivre alors un signal de commande en fonction de la valeur et du signe de l'écart entre la valeur souhaitée et la température de la pièce, soit de chauffer si la température de la pièce est inférieure à la température de consigne, soit d'arrêter de chauffer si la température de consigne est atteinte (c'est le principe du thermostat).

Dans la vie quotidienne nous sommes pratiquement toujours en boucle fermée. Pour chaque geste nous disposons d'un capteur (un de nos cinq sens, la vue, le toucher...), d'un correcteur (notre cerveau), d'un actionneur (muscles et articulations) pour tenter de rapprocher la situation réelle de celle qui est désirée [1].

I.4 La Régulation

La régulation automatique est l'ensemble des techniques qui permettent de contrôler une grandeur physique (température, vitesse, pression), sans intervention humaine, pour la maintenir à une valeur donnée, appelée consigne. C'est une branche de l'automatisme. Ces techniques ne sont pas seulement un moyen de commander des processus mais aussi un moyen de réduire les pertes de production, d'augmenter la qualité et la quantité des produits, d'augmenter la disponibilité des unités et de diminuer les coûts marginaux de production. Un automatisme bien pensé, surtout si son étude intervient en amont de la conception des unités de production, aura une implication économique importante.

La régulation des procédés industriels regroupe l'ensemble des moyens matériels et techniques mis en œuvre pour maintenir une grandeur physique à régler, égale à une valeur désirée, appelée consigne. Lorsque des perturbations ou des changements de consigne se produisent, la régulation provoque une action correctrice sur une grandeur physique du procédé, appelée grandeur réglante (ou commande).

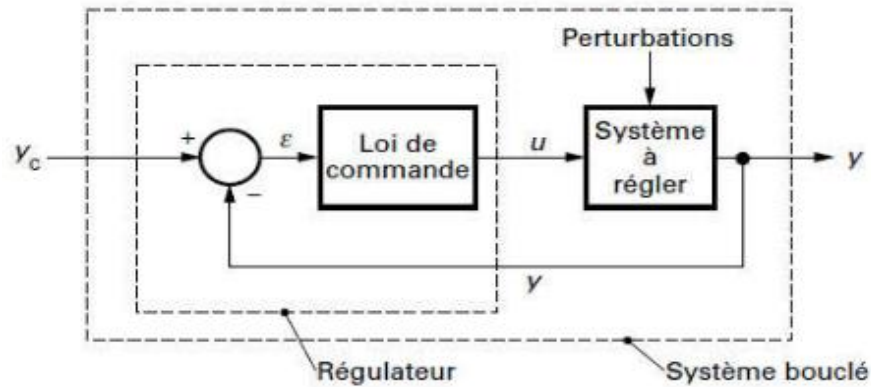


Figure I.3 : la boucle de régulation de base.

La conduite d'un procédé industriel (opération chimique, physico-chimique, mécanique ou électrique) implique la connaissance et la maîtrise de certains paramètres tels que la pression, la température, le débit, la vitesse, etc. Nous sommes donc amenés à effectuer des mesures pour obtenir certaines connaissances indispensables avant d'entreprendre une quelconque action. En salle de contrôle on peut accéder à ces informations sur des indicateurs, des enregistreurs, des écrans, etc. De façon analogue, les commandes nécessaires à la conduite du procédé s'effectuent soit sur le site, à proximité de l'appareillage, soit à partir de la salle de contrôle-commande, en manuel ou de façon automatique, programmé sur des ordinateurs (régulation numérique) [2].

L'objectif global de la régulation peut se résumer par ces trois mots clefs :

- mesurer
- comparer
- corriger

Une boucle de régulation doit comporter au minimum les éléments suivants :

- un capteur de mesure
- un transmetteur souvent intégré au capteur
- un régulateur
- un actionneur

On peut représenter une régulation de la manière suivante :

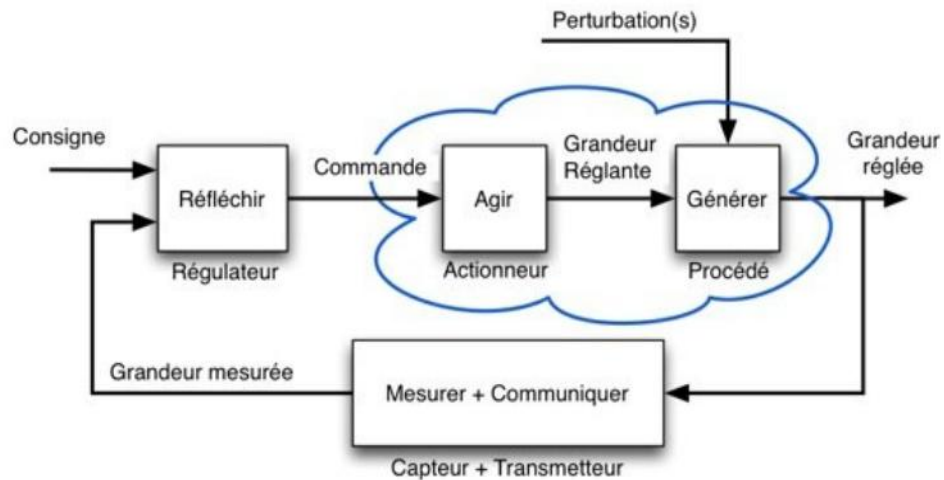


Figure I.4 : Schéma de principe de fonctionnement d'une régulation.

Exemple : Dans l'exemple de la figure (I.5) suivante, la température d'un fluide est réglée en agissant sur le débit de vapeur de l'échangeur et ceci quelles que soient les perturbations : débit de charge, température d'entrée de la charge....

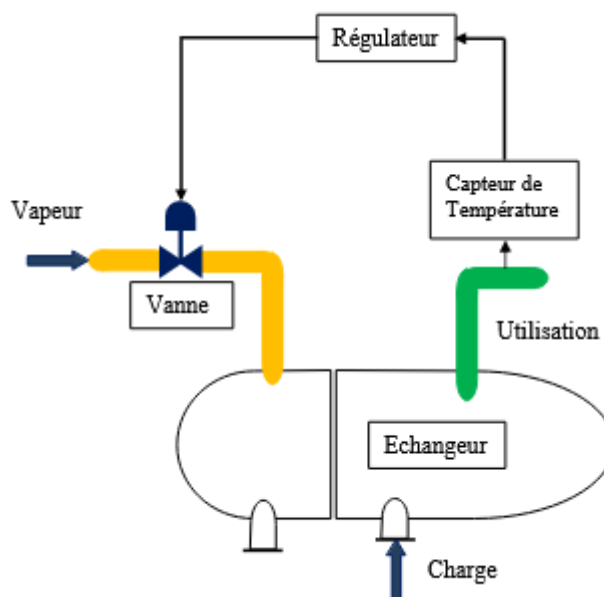


Figure I.5 : Régulation de température d'un échangeur thermique.

Dans le cas de la figure précédente, le capteur de température, le régulateur et la vanne, représentent le matériel qui permet de réaliser la technique de régulation la plus courante qui est la boucle fermée [3].

I.4.1 Éléments constitutifs d'une boucle de régulation

Une chaîne de régulation est formée d'une cascade d'appareils qui doivent être compatibles entre eux, tant du point de vue électrique que du point de vue précision et échelle de mesure.

a. Transmetteur de mesure (transducteur)

transmetteur est utilisé lorsque la mesure est éloignée du régulateur (par exemple distance supérieure à 10 m). Son rôle est de transformer la mesure physique en un courant (ex : 4-20 mA) ou une tension (ex : 0-10 V) moins sensibles aux parasites. Le transmetteur peut faire partie intégrante du capteur [2].

b. Capteur

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande. La précision et la rapidité sont deux caractéristiques importantes du capteur.

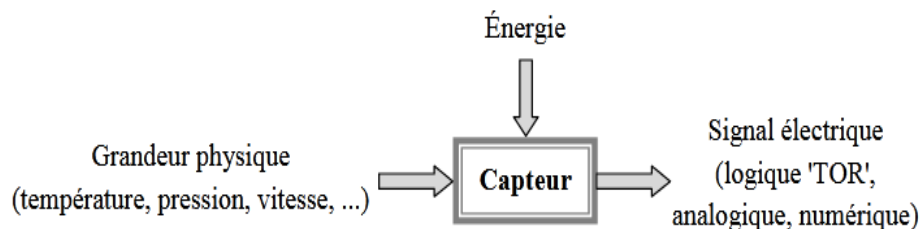


Figure I.6: Capteur élément de la chaîne de régulation.

c. Actionneur

L'actionneur est l'élément qui actionne le système à contrôler pour l'amener d'un état donné vers l'état souhaité. Il travaille souvent à puissance élevée. Les signaux de commandes sont en général faibles et servent à exciter des systèmes de puissances. Par exemple, le signal de commande d'une gâchette d'un MOSFET d'un hacheur est faible mais qui permet de libérer beaucoup d'énergie qui permet d'augmenter ou de diminuer la tension moyenne à la sortie du hacheur.

d. régulateur

Le régulateur se compose d'un comparateur qui détermine l'écart entre la consigne et la mesure et d'un correcteur qui élabore à partir du signal d'erreur l'ordre de commande.

I.4.2 Types de régulation industrielle

Il y'a plusieurs types de régulation industrielle possibles telles que :

1. **TOR** : Tout Ou Rien (ON-OFF Control).
2. **MLI** : Modulation de la Largeur d'Impulsion (PWM) avec PID.
3. **PID** : Continue Proportionnelle, Intégrateur, Dérivateur.
4. **FUZZY** : Continue PID avec l'introduction de la logique floue.
5. **MULTI-BOUCLES** : Maître Esclave, Cascade, Rapport.
6. **NUMERIQUE** : Modèle de référence.

I.5 Systèmes élémentaires**I.5.1 Système du premier ordre**

Un système est dit du 1er ordre si la relation entre son entrée et sa sortie est une équation différentielle du 1er ordre. La forme générale de l'équation différentielle d'un système du premier ordre d'entrée u et de sortie y est :

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = ku(t) \quad (I.1)$$

Avec :

K : gain statique

τ : constante du temps.

Fonction de transfert :

Par application de la TL à l'équation (I.3) On en déduit l'expression de la fonction de transfert, $H(p)$:

$$H(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{k}{1+\tau p} \quad (I.2)$$

Réponse indicielle :

La réponse indicielle, c'est-à-dire à un échelon (d'amplitude A_0), d'un système du 1er ordre est :

$$y(t) = K.A_0(1 - e^{-t/\tau}) \quad (I.3)$$

La réponse indicielle est représentée figure I.7.

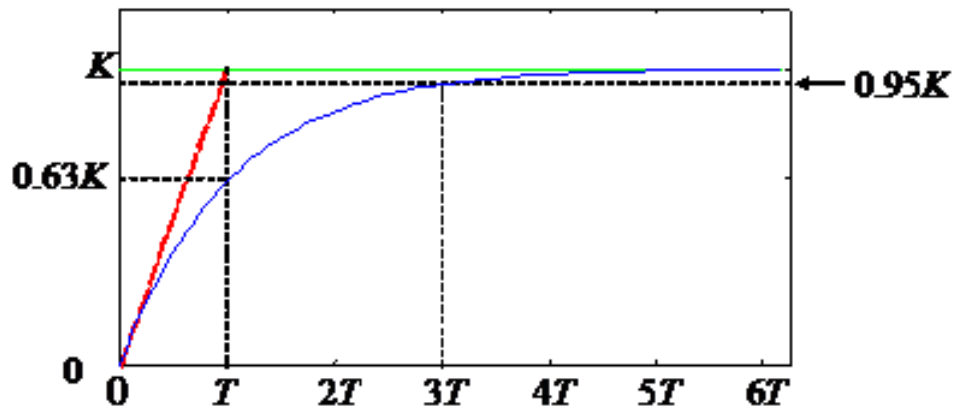


Figure I.7 : Réponse indicielle d'un système du 1er ordre.

I.5.2 Système du second ordre

Un système est dit du second ordre si la relation entre son entrée et sa sortie est une équation différentielle du 2ème ordre. La forme générale de l'équation différentielle d'un système du deuxième ordre d'entrée u et de sortie y est (on prendra toujours un second membre indépendant de $u'(t)$) :

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2m\omega_0 \frac{dy(t)}{dt} + \omega_0^2 \cdot y(t) = K\omega_0^2 \cdot u(t) \quad (\text{I.4})$$

Avec : K gain statique,
 m coefficient d'amortissement (parfois noté ξ),
 ω_0 pulsation propre non amortie.

Fonction de transfert :

Par application de la TL à l'équation I.4 (en prenant des conditions initiales nulles) il vient :

$$H(p) = \frac{K}{1 + \frac{2m}{\omega_0}p + \frac{p^2}{\omega_0^2}} \quad (\text{I.5})$$

Réponse indicielle :

$$y(p) = \frac{K}{p(1 + \frac{2m}{\omega_0}p + \frac{p^2}{\omega_0^2})} = \frac{k\omega_0^2}{p(p^2 + 2m\omega_0 p + \omega_0^2)} \quad (\text{I.6})$$

La dernière étape de détermination de $y(t)$ nécessite l'étude de trois cas en fonction de m :

- $m > 1$, régime apériodique.
- $m = 1$, régime critique.
- $m < 1$, régime pseudopériodique.

I.6 Critères de performance d'une régulation

I.6.1 Stabilité

Un système est stable si pour une entrée bornée la sortie est bornée. Les deux figures suivant (I.8) représenté un système instable :

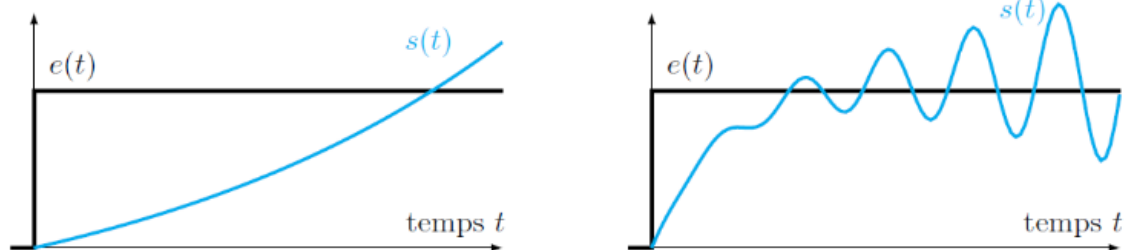


Figure I.8 : Systèmes instables dont la sortie diverge ou oscille sans se stabiliser[4].

La figure (I.9) représenté un système stable :

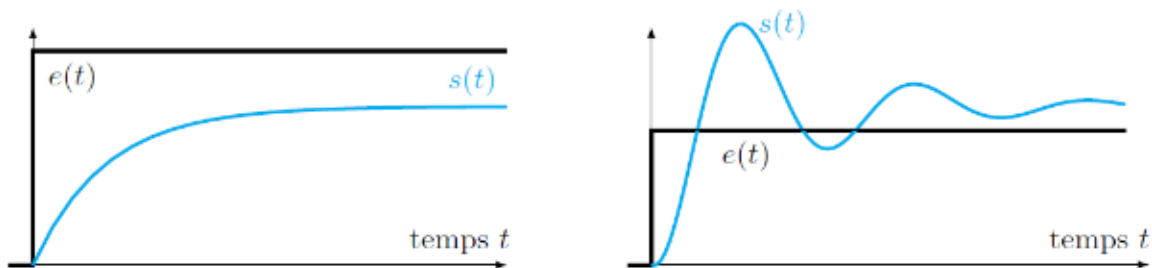


Figure I.9 : Systèmes stables dont les sorties convergent vers une valeur [4].

I.6.2 Rapidité

Un système est rapide s'il converge en un temps court au regard de son contexte d'utilisation. La rapidité d'un système est définie par son temps de réponse à 5 % ($t_{r5\%}$). C'est le temps mis par le système pour entrer dans une bande de $\pm 5\%$ autour de la valeur à convergence et ne plus en sortir. Plus le $t_{r5\%}$ est petit plus le système est rapide.

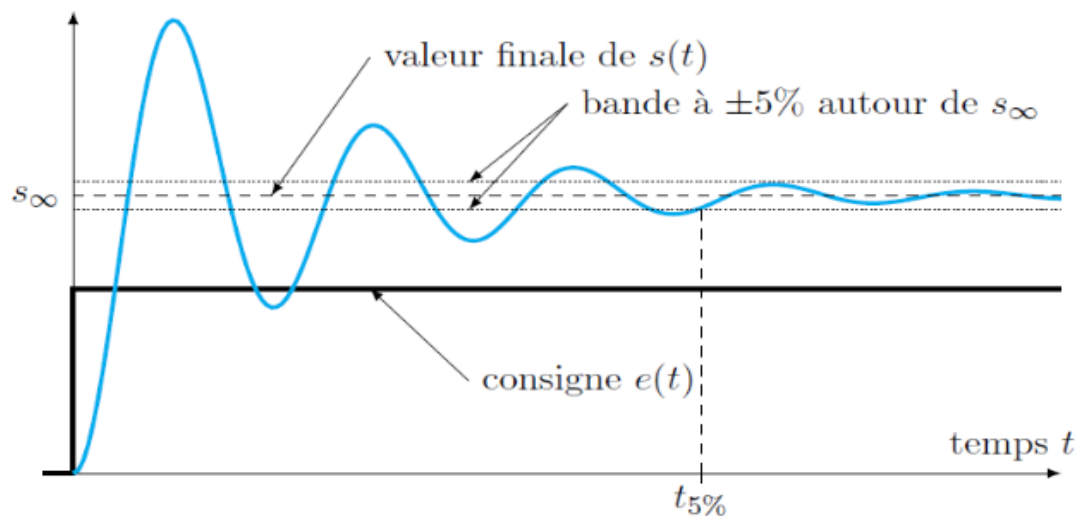


Figure I.10 : Caractérisation de la rapidité d'un système par le temps de réponse à 5% [4] .

I.6.3 Précision

La précision qualifie l'aptitude du système à atteindre la valeur de consigne à convergence. L'erreur $\mu(t)$ est la différence entre la consigne $e(t)$ et la sortie $s(t)$. Elle n'est définie que si la consigne et la sortie sont de mêmes natures.

$$\mu(t) = e(t) - s(t) \quad (\text{I.7})$$

Un système est précis si l'erreur statique μ_s est nulle. Comme indiqué la figure (I.11)

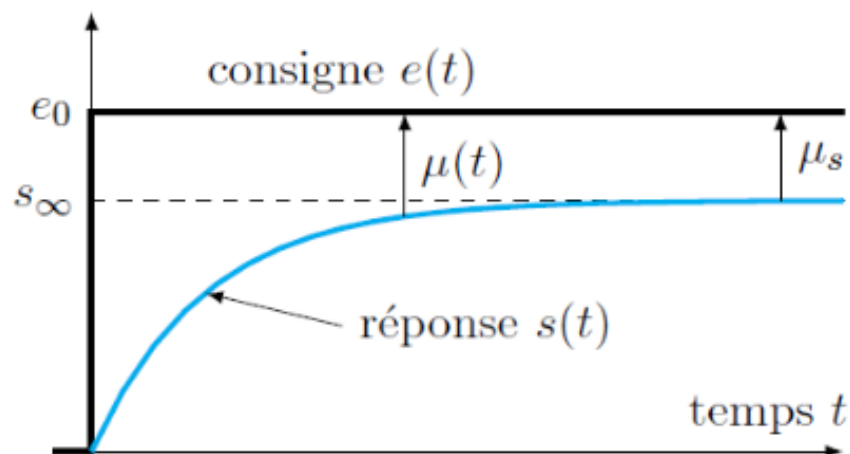


Figure I.11 : Caractéristique de la précision d'un système [4].

La régulation regroupe l'ensemble des techniques utilisées visant à maintenir constante une grandeur physique appelée **grandeur réglée** a une valeur désirée appelée **consigne**. Soumise à des **Perturbations** en agissant sur une autre grandeur physique appelée **grandeur réglant** pour un minimum **d'écart** possible et le plus **rapidement** possible (Économie d'énergie) sans **déstabilisée** la réponse (qualité du produit).

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu la notion de système, ensuite on vu la définition d'asservissement et la régulation et leur critères de performance. Dans le chapitre suivant, nous allons identifier les propriétés d'un régulateur plus utilisé dans l'industrie (PID).

CHAPITRE II

LES REGULATEUR PID

II.1 Introduction

Les régulateurs PID répondent à plus du 90% des besoins industriels et le nombre de régulateurs installés dans une usine pétrolière, par exemple, se compte par milliers. Malheureusement, malgré l'expérience acquise au des ans, les valeurs choisies pour les paramètres P, I et D ne sont pas toujours satisfaisantes, ni adaptées au processus à régler. L'histoire des régulateurs est déjà longue et il peut être intéressant de rappeler quelques étapes importantes. Les premiers régulateurs de type centrifuge apparaissent vers 1750 pour régler la vitesse des moulins à vent, suivi en 1788 du fameux contrôleur de vitesse d'une machine à vapeur de James Watt.

En 1942, Ziegler et Nichols ont proposé deux démarches permettant de trouver facilement les paramètres optimums pour une installation donnée. Au des ans, les propositions de Ziegler et Nichols ont été adaptées ou modifiées selon les besoins. En 1963, Horowitz a ajouté un degré de liberté supplémentaire au régulateur PID an de mieux contrôler les dépassements obtenus lors d'une réponse indicielle. Ce nouveau degré de liberté consiste, en particulier, à ne réinjecter vers le terme proportionnel qu'une partie du signal de sortie.

Au début des années 1990 et dans le but de fournir des règles d'ajustement simples mais plus performantes que celles de Ziegler-Nichols, Åström et ses collaborateurs ont analysé le comportement dynamique d'un grand nombre de processus. Cette analyse a conduit à l'établissement de tableaux servant aux calculs des paramètres P, I et D à partir de mesures simples [5].

II.2 Le régulateur PID

II.2.1 Définition

Le régulaeur PID, appelé aussi correcteur PID (proportionnel, intégrateur, dérivateur) est un système de contrôle, il est constitué d'un comparateur pour observer l'écart (erreur)entre la mesure et la consigne, et d'un correcteur dont l'algorithme permet d'obtenir une loi d'évolution de la mesure du procédé conforme au cahier des charges. Il permettant d'effectuer un asservissement en boucle fermée d'un système industriel ou « procédé » [6].

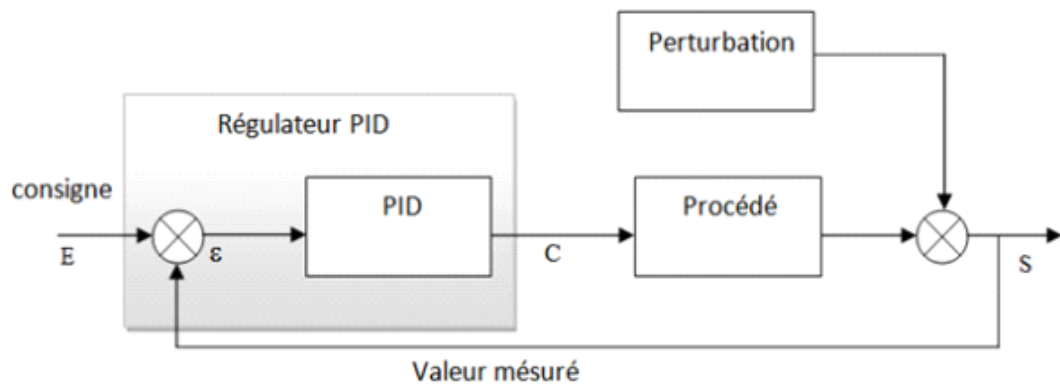


Figure II.1 : Asservissement par un régulateur PID.

S signal de mesure, E consigne (valeur entrée ou signal), et ε signal d'écart (ou d'erreur $e(t)$) sont exprimés dans la même unité. Le signal C élaboré par le régulateur est le signal de commande.

Rappelle : l'erreur statique est la valeur définie entre la consigne d'entrée et la valeur mesurée.

II.2.2 Description des régulateurs PID

Un régulateur PID remplit essentiellement trois fonctions :

1. Il fournit un signal de commande $u(t)$ en tenant compte de l'évolution du signal de sortie $y(t)$ par rapport à la consigne $w(t)$.
2. Il élimine l'erreur statique grâce au terme intégrateur.
3. Il anticipe les variations de la sortie grâce au terme dérivateur [7].

II.2.3 Types de contrôleurs

Les régulateurs standards les plus utilisés dans l'industrie sont les régulateurs de la famille PID (proportionnel, intégral, dérivé), car ils permettent de régler à l'aide de ces trois paramètres les performances (amortissement, temps de réponse, dépassement...) d'une régulation d'un processus modélisé du premier ordre et du deuxième ordre. La plupart des régulateurs comportent un algorithme identique à celui désigné par un "PID"[8].

- **P** : Action proportionnelle.
- **I** : Action intégrale.
- **D** : Action dérivée

L'adaptation d'un régulateur aux différents systèmes s'effectue par le réglage des coefficients (paramètres) de l'algorithme.

- Paramètre K_p pour le réglage de l'action proportionnelle.
- Paramètre K_i pour le réglage de l'action intégrale.
- Paramètre K_d pour le réglage de l'action dérivée.

II.2.4 Correcteur proportionnel (P)

Ce correcteur élémentaire est le correcteur de base, il agit principalement sur le gain du système asservi, il permet donc d'améliorer notablement la précision. Dans le cas d'un correcteur proportionnel, la loi de commande corrigée (t) est proportionnelle à l'écart (t)

$$u(t) = K \cdot e(t) \quad (\text{II.1})$$

$$c(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K(p) \quad (\text{II.2})$$

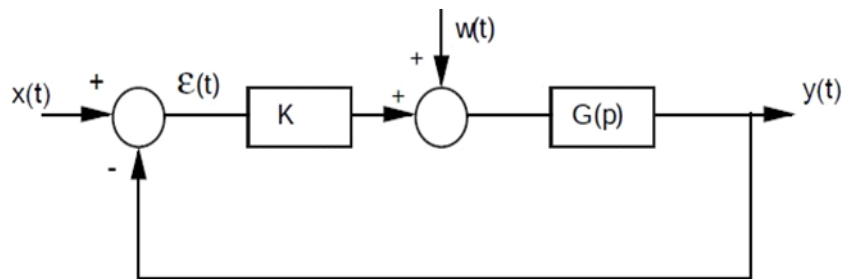


Figure II.2 : Commande proportionnelle P.

L'effet d'une augmentation du gain entraîne une diminution de l'erreur statique, et rend le système plus rapide mais engendre l'instabilité du système.

II.2.5 Correcteur proportionnel – intégrale (PI)

L'action proportionnelle est une fonction qui fait varier le signal de sortie du régulateur proportionnellement à l'écart entre la mesure et la consigne. Le correcteur intégral est fréquemment combiné au correcteur proportionnel pour améliorer le régime permanent et le régime transitoire. Cette combinaison est appelée correcteur proportionnel-intégral.

Le coefficient de proportionnalité, appelé gain du régulateur, est obtenu par le réglage du paramètre du régulateur.

L'équation dans le domaine temporel de ce correcteur est écrite par l'expression :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (\text{II.3})$$

Où $e(t)$, K_p et K_i désignent respectivement l'erreur à l'instant t , la commande générée et les gains du correcteur.

La fonction de transfert du contrôleur correspondante est donnée par :

$$C(p) = K_p + \frac{K_p}{p} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) \quad (\text{II.4})$$

Avec : $T_i = K_p / K_i$

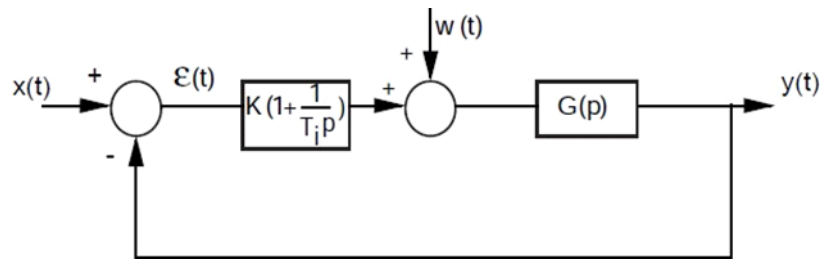


Figure II.3 : Commande proportionnelle-intégrale PI.

L'introduction d'un correcteur PI permet d'améliorer la précision et de rejeter les perturbations de type échelon. Par contre, ce type de correcteur possède certaines limitations sur l'amélioration de la rapidité et peut même introduire une instabilité du système en boucle fermée.

II.2.6 Correcteur proportionnel – dérivée (PD)

L'inconvénient majeur du correcteur dérivé est son insensibilité aux variations lentes de l'erreur. Pour cette raison, ce type de correcteur n'est jamais utilisé seul. La solution permettant de minimiser cet inconvénient est de le combiner au correcteur proportionnel

Nous représentons le correcteur PD dans le domaine du temps par l'équation suivante :

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{II.5})$$

K_d : Gain de l'action dérivée.

La fonction de transfert correspondante est :

$$C(p) = K_p + K_d p = K_p (1 + T_d p) \quad (\text{II.6})$$

Avec : $T_d = k_d/k_p$

Ce type de correcteur possède la structure suivante :

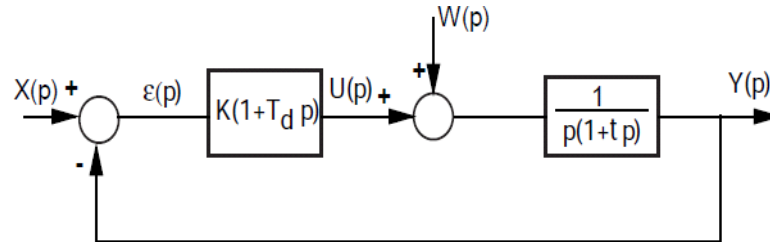


Figure II.4 : Commande proportionnelle-dérivée PD.

Cette action n'a pas d'effet que lorsqu'il y a variation de l'erreur, elle n'a aucun effet sur le fonctionnement en régime permanent. Les correcteurs PD permet donc d'améliorer le régime transitoire .

II.2.7 Correcteur proportionnel - intégrale – dérivée

Les termes proportionnel et intégral peuvent amener un dépassement de la consigne et des oscillations. Cela implique pour le moteur par exemple des inversions de polarité, ce qui est loin d'être idéal. Pour limiter ce phénomène indésirable, on introduit un troisième élément qui est le terme dérivé. Son action va dépendre du signe et de la vitesse de variation de l'erreur, et sera opposée à l'action proportionnelle. Elle devient prépondérante aux abords de la valeur demandée lorsque l'erreur devient faible, que l'action du terme proportionnel faiblit et que l'intégrale varie peu : elle freine alors le système, limitant le dépassement et diminuant le temps de stabilisation.

Le schéma général de la boucle fermée est donné par :

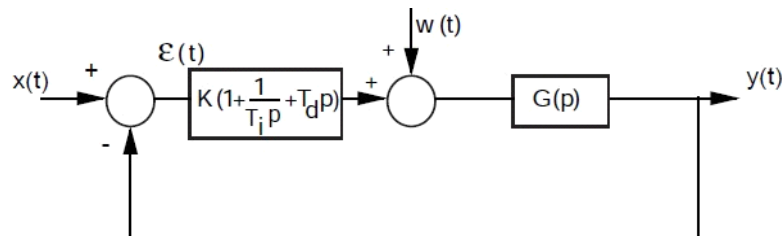


Figure II.5 : Commande PID.

L'intérêt du correcteur PID est d'intégrer les effets positifs des trois correcteurs précédents.

La détermination des coefficients K_p , K_i , K_d du correcteur PID permet d'améliorer à la fois la précision (K_p et K_d), la stabilité (K_d) et la rapidité (K_p , K_d).

Le réglage d'un PID est en général assez complexe, des méthodes pratiques de réglages permettent d'obtenir des bons résultats. Il est régi par la relation suivante :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{II.6})$$

Sa fonction de transfert est donnée par :

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p = k_p (1 + T_d \frac{1}{T_i p}) \quad (\text{II.7})$$

En général, on a les qualités suivantes du correcteur PID :

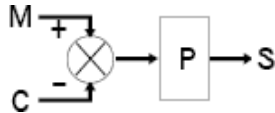
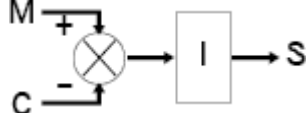
- L'action proportionnelle est souvent utilisée pour la rapidité du système bouclé;
- L'action intégrale est employée pour améliorer l'erreur en régime permanent ;
- L'action dérivée assure l'amélioration de la stabilité

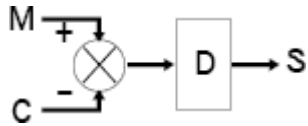
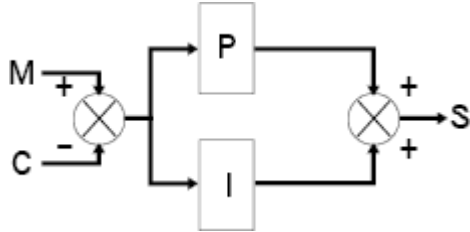
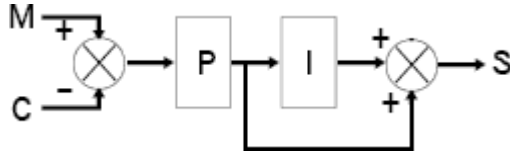
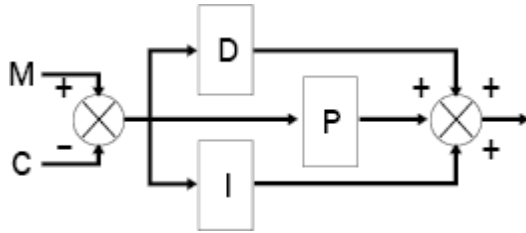
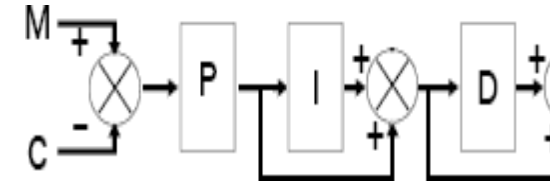
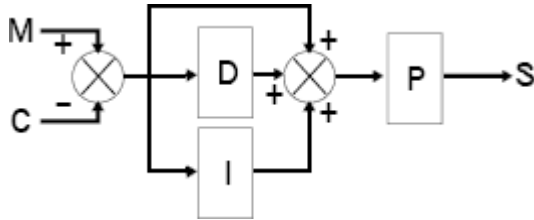
II.2.7.1 Synthèse du régulateur PID

II.2.7.1.1 Les différentes structures du PID

C'est le plus couramment utilisé des régulateurs de tableau du commerce. Il peut être de structure parallèle, série ou mixte (série parallèle)[9].

Tableau II.1 : Les différentes structures du PID.

Type	Schéma	Signal de commande
P		$S_P(t) = K.\varepsilon = K(M - C)$
I		$S_I(t) = \frac{1}{T_i} \int \varepsilon dt = \frac{1}{T_i} \int (M - C) dt$

D		$S_d(t) = T_d \frac{d\epsilon}{dt} = T_d \cdot \frac{d(M-C)}{dt}$
PI parallèle		$S(t) = K \cdot \epsilon + \frac{1}{T_i} \cdot \int \epsilon dt$
PI série		$S(t) = K \cdot \epsilon + \frac{K}{T_i} \cdot \int \epsilon dt$
PID parallèle		$S(t) = K \cdot \epsilon + T_d \frac{d\epsilon}{dt} + \frac{1}{T_i} \int \epsilon dt$
PID série		$S(t) = K \left(\frac{T_i + T_d}{T_i} \right) \epsilon + K \cdot T_d \cdot \frac{d\epsilon}{dt} + \frac{K}{T_i} \cdot \int \epsilon dt$
PID mixte		$S(t) = K \cdot \epsilon + K \cdot T_d \frac{d\epsilon}{dt} + \frac{K}{T_i} \int \epsilon dt$

II.2.7.2 Rôle des actions dans la boucle fermée

II.2.7.2.1 Rôle de l'action proportionnelle (P)

Le rôle de l'action proportionnelle est d'accélérer la réponse de la mesure, ce qui a pour conséquence de réduire l'écart entre la mesure et la consigne. L'étude de l'action proportionnelle sur un système naturellement stable en boucle fermée, montre que lors d'un changement de consigne, le régime permanent atteint un écart résiduel [10] :

L'étude de l'action proportionnelle sur un procédé instable (aussi appelé intégrateur), montre que lors d'une variation de consigne, la mesure rejoint la consigne, la mesure rejoint la consigne dans tous les cas. Lors d'une perturbation, la mesure s'écarte de la consigne, la régulation proportionnelle tend à la ramener tout en laissant subsister un écart résiduel ε , lorsque le régime permanent est atteint .

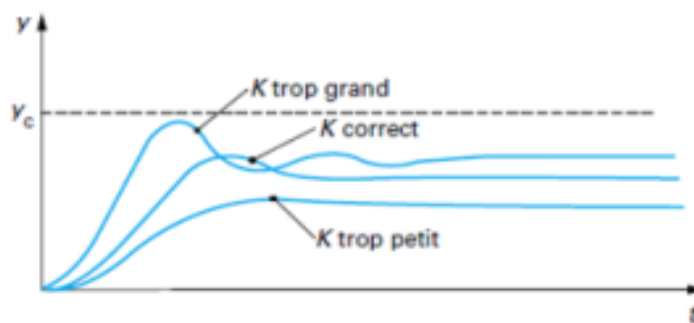


Figure II.6 : Rôle de l'action proportionnelle.

II.2.7.2.2 Rôle de l'action Intégrale

Le rôle de l'action intégrale est d'annuler l'écart entre la mesure et la consigne. Le signal de sortie du régulateur en intégrateur seul est proportionnel à l'intégrale de l'écart mesure-consigne.

L'action intégrale est généralement associée à l'action proportionnelle. Comme dans le cas de l'action proportionnelle, une augmentation excessive de l'action intégrale (diminution de T_i) peut être source d'instabilité. L'étude de l'action intégrale sur un système stable est donnée par les figures suivantes pour un test en asservissement et un autre en régulation.

Le comportement de l'action intégrale sur un procédé instable, est sensiblement le même que sur un procédé stable. Il faut noter que l'action intégrale est nécessaire pour annuler l'écart, suite à des perturbations. Lors de changement de consigne, son intérêt est moindre car l'écart s'annule naturellement du fait que le procédé est lui même intégrateur.

Dans ce cas l'action intégrale donne une réponse plus rapide qu'en régulation à action proportionnelle seule.

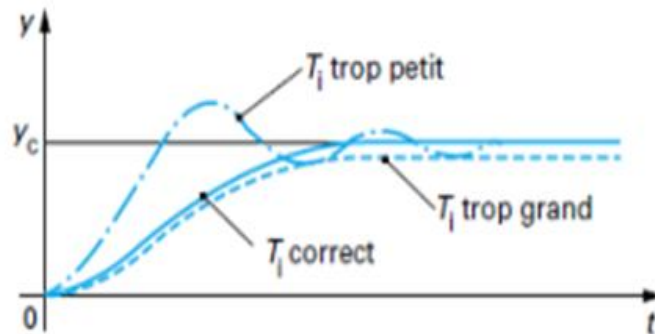


Figure II.7 : Rôle de l'action intégral.

II.2.7.2.3 Rôle de l'action dérivée

Le rôle de l'action dérivée est de compenser les effets du temps mort (retard) du procédé. Elle a un effet stabilisateur mais une valeur excessive peut entraîner l'instabilité. Son rôle est identique quelle que soit la nature du procédé. La sortie du dérivateur est proportionnelle à la vitesse de variation de l'écart. Notons que l'action dérivée ne peut pas être utilisée seule. L'étude de l'action dérivée sur un système stable est donnée par les figures suivantes pour un test en asservissement et un autre en régulation.

Dans le cas d'un signal de mesure bruité, la dérivée amplifie le bruit, ce qui rend son utilisation délicate ou impossible. La solution à ce problème consiste, soit à filtrer le signal de mesure, soit à utiliser un module de dérivée filtrée avec un gain transitoire réglable.

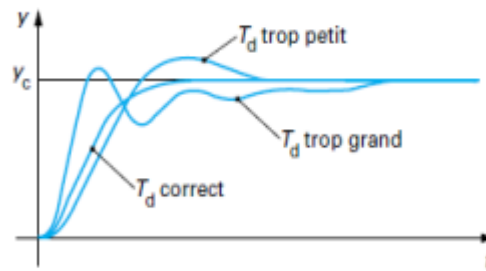


Figure II.8 : Rôle de l'action dérivée.

Dans tous les algorithmes PID, la dérivée est filtrée, mais la valeur du filtre (gain transitoire), est rarement réglable sur les régulateurs monoblocs ; elle l'est parfois, sur les modules PID des systèmes numériques.

II.3 Méthodes de réglage des actions

Avant de commencer les réglages d'une boucle de régulation, il faut s'assurer que le sens d'action du régulateur est correct. Nous rappelons que quelle que soit la méthode de réglage utilisée, les réglages ne sont adaptés qu'au point de fonctionnement.

Il existe différentes méthodes de réglage des actions d'un régulateur P.I.D. suivant le type de procédé et les contraintes de fabrication on choisira l'une des méthodes. Quelle que méthode de réglage [11] :

❖ Méthode par approches successives

Elle consiste à modifier les actions du régulateur et à observer les effets sur la mesure enregistrée, jusqu'à obtenir la réponse optimale. On règle l'action proportionnelle, puis l'action dérivée et l'intégrale. Cette technique présente l'intérêt d'être simple et utilisable sur n'importe quel type de système. Néanmoins du fait de son caractère itératif, son application devient longue sur des procédés à grande inertie.

❖ Méthode nécessitant l'identification du procédé

Si l'on connaît les paramètres du procédé, suite à une modélisation de sa fonction de transfert réglante, et si l'on est en possession de la structure du régulateur. Il est alors possible de calculer rapidement les paramètres de réglage qu'on pourra affiner suite à des essais, afin d'obtenir la réponse souhaitée. Cette méthode nécessite un enregistreur à déroulement rapide. Elle est de préférence utilisée sur des procédés à grande inertie.

❖ Méthode de Ziegler et Nichols

Elle nécessite l'observation de la réponse du procédé et la connaissance de la structure du régulateur. C'est une méthode qui permet le calcul des actions, sans la détermination des paramètres du procédé.

II.3.1 Réglage à partir de l'identification du procédé

L'identification d'un procédé permet d'obtenir les paramètres caractéristiques (gain statique, constante de temps, ...). A partir de ces paramètres, on calcule les actions à afficher sur le régulateur ; ce calcul dépend [12] :

- du modèle choisi pour l'identification ;
- de la structure du régulateur utilisé (série, parallèle,...)
- du mode de régulation choisi (P , PI, PID,...)

II.3.1.1 Cas d'un procédé stable

Après avoir identifié le procédé suivant le modèle d'un premier ordre retardé, on utilise le tableau suivant pour calculer les actions à afficher sur un régulateur compte tenu de sa structure.

$$H_i(p) = \frac{k.e^{-\theta p}}{1+\tau.p} \quad (II.8)$$

Le choix du mode de régulation est lié à la réglabilité du système déterminé par le rapport τ/θ

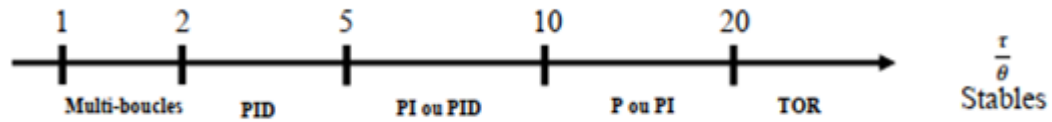
Si τ/θ est compris entre 10 et 20 : régulation P

Si τ/θ est compris entre 5 et 10 : régulation PI

Si τ/θ est compris entre 2 et 5 : régulation PID

Si τ/θ est supérieur 20 : régulation Tout Ou Rien (TOR)

Si τ/θ est inférieur à 2 : régulation multi boucles, régulation numérique

Tableau II.2: Tableau des différents régulation cas d'un procédé stable.

Régulations	P	P.I Série	P.I Parallèle	P.I.D Série	P.I.D Parallèle	P.I.D Mixte1	P.I.D Mixte 2
Gr	$\frac{0.8\tau}{Gs \cdot \theta}$	$\frac{0.8\tau}{Gs \cdot \theta}$	$\frac{0.8\tau}{Gs \cdot \theta}$	$\frac{0.85\tau}{Gs \cdot \theta}$	$\frac{\frac{\theta}{\tau} + 0.4}{1.2Gs}$	$\frac{\frac{\theta}{\tau} + 0.4}{1.2Gs}$	$\frac{\frac{\theta}{\tau} + 0.4}{1.2Gs}$
Ti	Maxi	0	$\frac{Gs \cdot \theta}{0.8}$	τ	$\frac{Gs \cdot \theta}{0.75}$	$\tau + 0.4\theta$	$\tau + 0.4\theta$
Td	0	0	0	0.4τ	$\frac{0.35\tau}{Gs}$	$\frac{\theta \cdot \tau}{\theta + 2.5\tau}$	$\frac{0.35\tau}{Gs}$

Après calcul et affichage des actions, il est nécessaire d'effectuer un test sur une variation de consigne, pour vérifier l'allure de la réponse. Si les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants, refaire l'identification, s'assurer de la structure du régulateur ou retoucher les actions.

II.3.2 Réglage par la méthode de Ziegler et Nichols

Cette méthode est identique pour procédés stables et instables, mais n'est pas adaptée pour des boucles de régulation rapides (débit par exemple) et les procédés à retard important. La méthode consiste à mettre la boucle de régulation en oscillations entretenues. La période des oscillations T_{osc} et le gain du régulateur critique G_{rc} qui occasionne ces oscillations, permettent de calculer les actions à afficher sur le régulateur. Ce calcul dépend de la structure du régulateur utilisé et du mode de régulation choisi (P, PI, PID). Le critère de performance choisi par Ziegler et Nichols donne une réponse avec un amortissement par période de l'ordre de 0,25 [11].

II.3.2.1 Mode opératoire

C'est une méthode expérimentale qui permet de régler les actions d'un régulateur à partir de la mise en « pompage régulier » de la mesure.

- Mettre le régulateur en action proportionnelle ($T_i = \text{maxi}$ ou $n = 0$ et $T_d = 0$)
- Passer le régulateur en automatique
- Augmenter l'action proportionnelle en faisant de petits échelons de consigne jusqu'à l'obtention du pompage régulier de la mesure

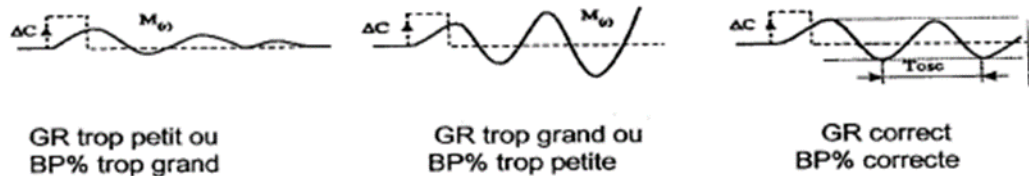


Figure II.9 : Courbes des GR et BP%.

- Relever la période des oscillations T et le gain critique du régulateur G_{rc} .
- Calculer les actions du régulateur à l'aide du tableau suivant.

II.3.2.2 Calcul des actions

Tableau II.3 : Tableau des différents réglage cas de réglage Ziegler et Nichols.

Régulations	P	P.I Série	P.I Parallèle	P.I.D Série	P.I.D Parallèle	P.I.D Mixte1	P.I.D Mixte 2
Gr	$\frac{G_{rc}}{2}$	$\frac{G_{rc}}{2.2}$	$\frac{G_{rc}}{2.2}$	$\frac{G_{rc}}{3.3}$	$\frac{G_{rc}}{1.7}$	$\frac{G_{rc}}{1.7}$	$\frac{G_{rc}}{1.7}$
Ti	Maxi	$\frac{G_{rc}}{1.2}$	$\frac{2T}{G_{rc}}$	$\frac{T}{4}$	$\frac{0.85T}{G_{rc}}$	$\frac{T}{2}$	$\frac{T}{2}$
Td	0	0	0	$\frac{T}{4}$	$\frac{G_{rc} \cdot T}{13.3}$	$\frac{T}{8}$	$\frac{G_{rc} \cdot T}{13.3}$

$$K_p = \frac{G_{rc}}{1.7}, \quad T_i = \frac{T_{osc}}{2}, \quad T_d = \frac{T_{osc}}{8}$$

C'est un exemple de réponse d'un système commandé par PID avec une structure mixte, La méthode de Ziegler-Nichols indique alors des valeurs des coefficients permettant d'obtenir un bon compromis entre précision, rapidité et stabilité.

II.4 Schéma bloc

Le schéma bloc du system avec des différentes structures de PID, On prend un exemple du système de 3ème ordre de la fonction de transfert suivant [12]:

$$F(p) = \frac{6}{p^3 + 6p^2 + 11p + 6}$$

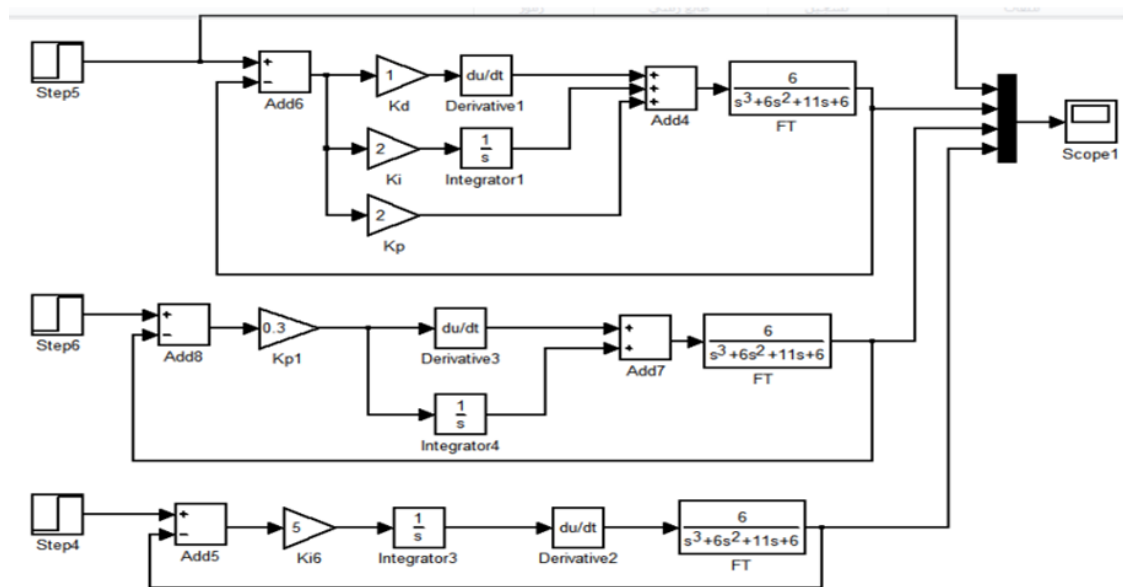


Figure II.10 : Schéma bloc du système de 3ème ordre commandé par les différentes structures de PID.

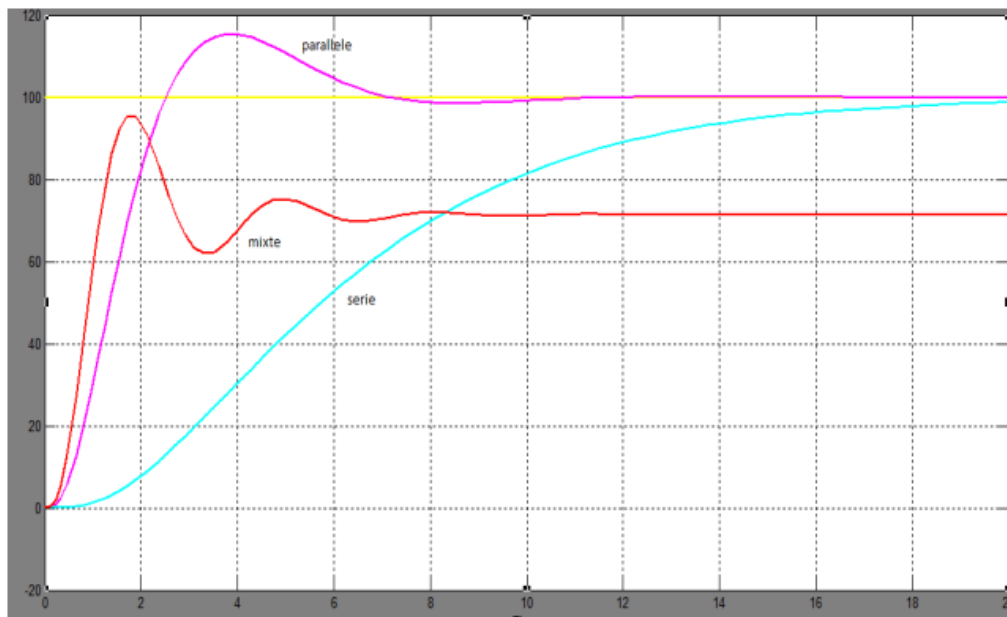


Figure II.11 : La réponse du système de 3eme ordre commandé par PID.

Remarque : on observe que la meilleure réponse est la réponse de la structure parallèle.

On a un autre réponse d'un système avec tous les autres régulateurs précédents :

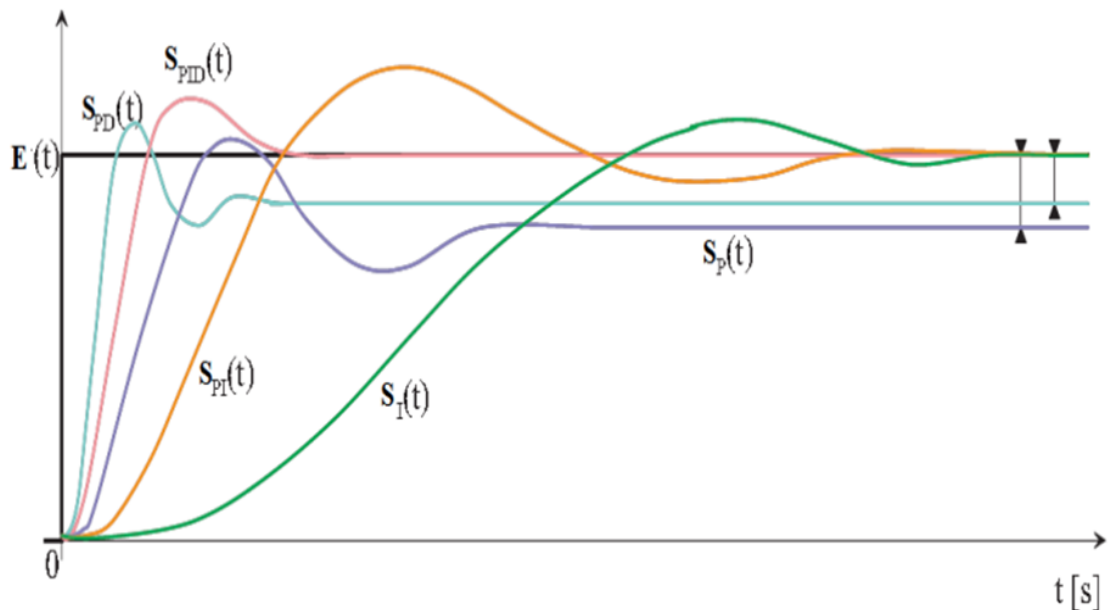


Figure II.12 : Réponse d'un système avec tous les autres régulateurs.

II.5 Conclusion

Ce chapitre est consacré à donner une idée générale sur les systèmes asservis par les régulateurs PID. les structures de réglage classique avec une définition des régulateurs les plus utilisés (P, PI, PD et PID) Ainsi que leur principe de fonctionnement détaillée (la

composante "P" réagit à l'apparition d'un écart de réglage, la composante "I" élimine l'erreur statique et la composante "D" diminue le dépassement) ; nous avons étudié aussi les plusieurs façons d'associer les paramètres P, I et D et cité quelque méthodes de conception du régulateur PID et a présenté brièvement deux méthodes (Méthode nécessitant l'identification du procédé et la méthode de Ziegler et Nichols).

CHAPITRE III

LA LOGIQUE FLOUE

III.1 Introduction

Dans le cadre de recherche pour le développement de nouvelles technologies basées sur l'intelligence artificielle, la logique floue a reçu un immense intérêt par les chercheurs et les industriels depuis le début de la deuxième moitié du dernier siècle. Avant cette tournure dans la définition de la logique, tous les algorithmes et les procédés se basaient sur la logique classique. La logique classique n'admet aucun état entre le vrai et faux, ou aucune valeur entre le 0 et 1, contrairement à la logique floue qui a l'avantage de traiter même les valeurs entre 0 et 1 en se basant sur le raisonnement humain .

Les travaux de Lotfi A. Zadeh (Professeur de l'Université de Californie de Berkeley) ont été les premiers qui présentaient la logique floue comme une méthode de classification pertinente en ayant établi les principes de bases. Initialement, la logique floue a été désignée comme un algorithme de classification qui a été utilisé pour l'analyse de données, surtout dans des domaines comme le commerce et la médecine. Cependant, son principe de raisonnement inspiré du raisonnement humain a attiré Marndani qui a été le premier qui a introduit la notion de la logique floue dans le domaine de contrôle en 1974 [13] [14].

III.1.1 Définition

La logique floue est un type de modélisation qui s'intéresse à la prédiction d'une variable catégorielle Y « subjective » au sens où elle n'est pas objectivable : elle dépend de l'observateur (l'individu est « grand », « moyen » ou « petit »). Ce cadre sort de la statistique classique dans lequel la valeur de la variable Y est objectivable (« l'individu mesure 176 cm »). L'application de la logique floue revient à tenter d'appliquer un raisonnement proche de la pensée humaine :

Les variables prédictives (comme la variable à prédire) sont catégorielles avec des modalités subjectives (« grand », « petit ») et non pas de données objectivables (176 cm). Ces variables catégorielles sont appelées « variables linguistiques ». Dans le cadre statistique usuel, la variable continue initiale (ici la taille en cm) peut être discrétisée pour donner des intervalles distincts, par exemple : « petit < 170cm < moyen < 180cm < grand ». La logique floue vise à prendre en compte les incertitudes qui existent au voisinage des seuils (due en partie à des principes de subjectivité) [15] .

III.1.2 Comparaison : la logique floue et logique classique

La logique booléenne classique ne permet que deux états : VRAI ou FAUX. La logique floue fut proposée par Zadeh en 1965 ; elle permet d'exprimer différents niveaux, plutôt que seulement 1 ou 0. Par exemple : le moteur est chaud, le moteur est très chaud. Quelle est la différence entre <chaud> et <très chaud>? Ou encore, un homme est haut s'il mesure 170cm. Un homme est très haut s'il mesure 190cm. Où est la ligne de démarcation ? Un homme de 180cm est-il haut ou très haut ? 180.5cm ? 179.5cm ?

La logique floue est une branche des mathématiques qui permet à un ordinateur de modéliser le monde réel de la même façon que les personnes. Elle est préoccupée par la quantification et le raisonnement en utilisant un langage qui permet des définitions ambiguës, comme " beaucoup, peu, petit, haut, dangereux. Elle s'occupe de situations où la question qui est posée et la réponse obtenue contiennent des concepts vagues.

Selon la logique floue, le raisonnement exact est un cas limite du raisonnement approximatif ; tout n'est qu'un degré. Tout système logique peut être rendu flou. Les connaissances sont interprétées comme une collection de contraintes élastiques ou floues d'un ensemble de variables. L'inférence est un processus de propagation de contraintes élastiques. La logique booléenne est un sous-ensemble de la logique floue.

La logique floue permet d'accommoder le concept de vérité partielle : des valeurs entre complètement vrai et complètement faux sont admises. On supporte des modes de raisonnement approximatifs plutôt qu'exacts. Son importance provient du fait que le raisonnement humain est approximatif [16].

III.2 La théorie des sous-ensembles flous

La théorie des sous-ensembles flous répond au besoin de représenter des connaissances imprécises dues soit à un manque de précision de l'observateur qui s'exprime en langage naturel, soit à des erreurs de mesures de l'instrument d'observation. Ce concept de sous-ensemble flou constitue une extension des sous-ensembles d'un ensemble donné avec certaines caractéristiques présentées ci-dessous [17].

III.2.1 Définition d'un sous-ensemble flou

Prenons un ensemble de référence U . Les éléments de U qui possèdent une même propriété constituent, d'après la théorie des ensembles, un même sous-ensemble classique A

de U . Ainsi, l'élément qui n'est pas caractérisé par la propriété va appartenir au sous-ensemble complémentaire de A .

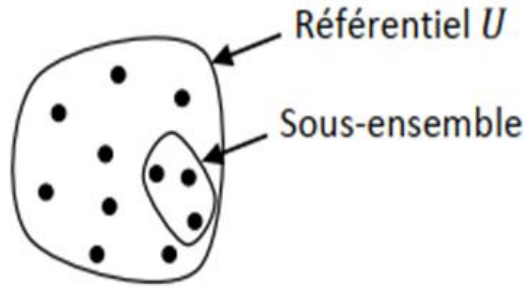


Figure III.1 : Sous-ensemble classique de U .

Toutefois, dans certaines situations, un élément de U peut satisfaire la propriété seulement en partie, comme dans l'expression « il fait plutôt chaud aujourd'hui ». L'orateur ne décide pas de caractériser le temps en choisissant entre la situation « chaude » ou « froide » mais en modulant ses propos. Cette expression va pouvoir être traitée en indiquant avec quel degré elle appartient à un sous-ensemble de U . Pour ce faire, en 1965, Zadeh introduit la notion de sous-ensemble flou.

Ainsi, tout élément de U appartient à un sous-ensemble flou avec un degré d'appartenance. Ce degré d'appartenance peut-être égal à 1 en cas d'appartenance absolue [17].

III.2.2 Caractéristiques d'un sous-ensemble flou

Les ensembles flous diffèrent des ensembles classiques par le biais de quatre principales caractéristiques :

- **Le support :** il correspond à l'ensemble des éléments de U appartenant au moins un peu au sous-ensemble A . Il est noté $sup(A)$ et se formule de la façon suivante :

$$sup(A) = \{u \in U / \mu_A(u) \neq 0\} \quad (III.1)$$

- **La hauteur :** il s'agit du plus fort degré avec lequel un élément de U appartient à A , s'exprimant :

$$h(A) = \sup_{u \in U} \mu_A(u) \quad (III.2)$$

- **Le noyau** : il est noté $no(A)$ et correspond à l'ensemble des éléments de U appartenant de façon absolue au sous-ensemble flou A . Autrement dit, il s'agit de tous les éléments pour lesquels la fonction d'appartenance de A vaut 1 :

$$no(A) = \{u \in U / \mu_A(u) = 1\} \quad (III.3)$$

- **La cardinalité** : elle correspond au degré global avec lequel les éléments de U appartiennent à A , et se formule :

$$|A| = \sum_{u \in U} \mu(u) \quad (III.4)$$

On peut illustrer les trois premières caractéristiques à l'aide du graphique suivant :

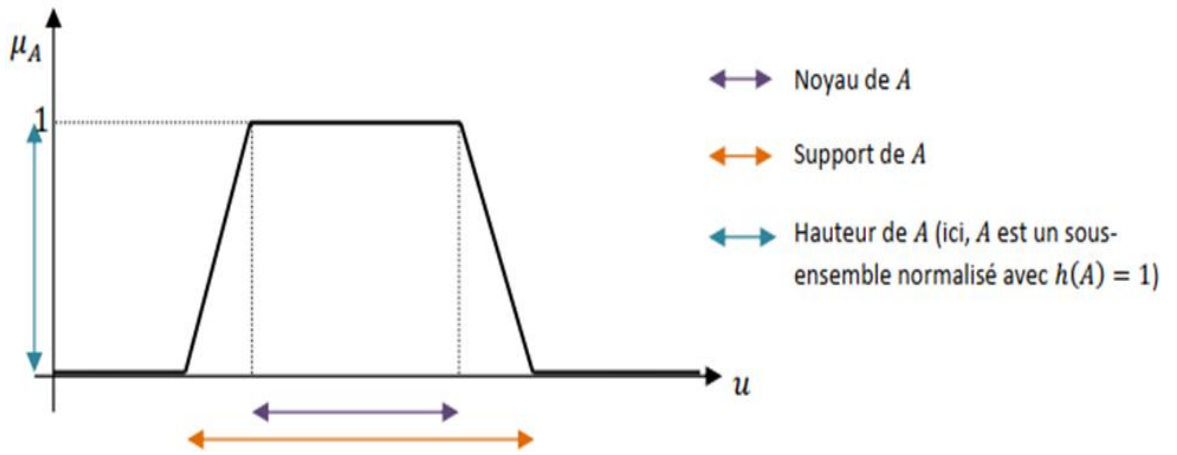


Figure III.2 : Caractéristiques d'un ensemble flou.

III.2.3 Opérations sur les sous-ensembles flous

Les opérations sur les sous-ensembles flous s'inspirent des opérations mathématiques classiques et ont pour objectif de gérer des combinaisons logiques entre des notions floues, telles que la satisfaction simultanée de deux propositions.

Si A et B sont deux sous-ensembles flous de U et $\mu(u)$ et $\mu_B(u)$ leurs fonctions d'appartenance, nous pouvons définir cinq opérations [18]:

a)Égalité : Deux sous-ensembles flous A et B de U sont égaux si leurs fonctions d'appartenance prennent la même valeur pour tout élément de U :

$$A = B \text{ ssi } \forall u \in U, \mu(u) = \mu_B(u) \quad (III.5)$$

b) Inclusion : Etant donné deux sous-ensembles flous A et B de U , l'ensemble A est inclus dans l'ensemble B , ($A \subseteq B$), si leurs fonctions d'appartenance sont telles que :

$$\forall u \in U, \mu_A(u) \leq \mu_B(u) \quad (\text{III.6})$$

c) Intersection : L'intersection de deux sous-ensembles A et B de U correspond à l'opérateur logique ET, notée $A \cap B$ telle que :

$$\forall u \in U, \mu_{A \cap B}(u) = \min(\mu_A(u), \mu_B(u)) \quad (\text{III.7})$$

Où $\min(.,.)$ désigne l'opérateur de minimisation.

Reprenons l'exemple de la taille d'un homme avec trois catégories « petit », « moyen » et « grand ». Le graphique qui suit représente les fonctions d'appartenance :

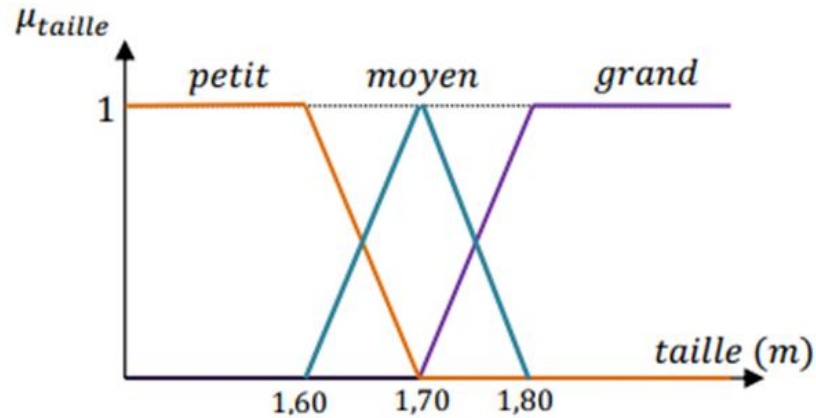


Figure III.3 : Ensembles flous liés à la taille d'un homme.

L'intersection des deux propositions « personne de petite taille » et « personne de taille moyenne » s'illustre donc ainsi :

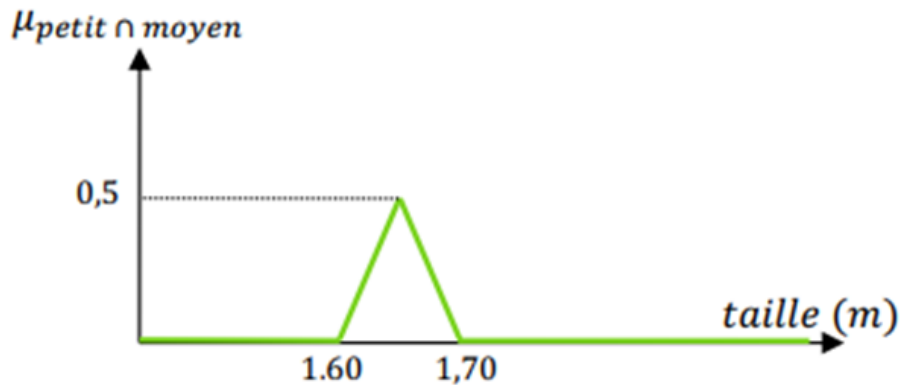


Figure III.4 : Intersection des sous-ensembles « petit » et « moyen ».

d) Union : L'union de deux sous-ensembles A et B de U correspond à l'opérateur logique OU, notée $A \cup B$ telle que :

$$\forall u \in U, \mu_{A \cup B}(u) = \max(\mu_A(u), \mu_B(u)), \quad (\text{III.8})$$

Où $\max(,)$ désigne l'opérateur de maximisation.

D'après l'exemple précédent, l'union des propositions « personne de petite taille » et « personne de taille moyenne » se représente de la façon suivante :

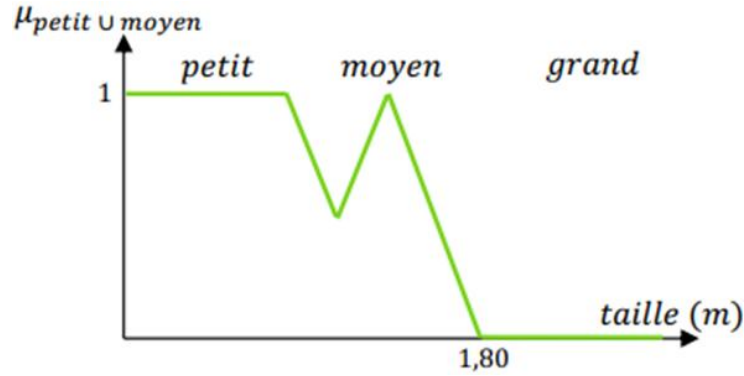


Figure III.5 : Union des sous-ensembles « petit » et « moyen ».

e) Propriétés de l'union et de l'intersection

Ces deux opérateurs logiques vérifient :

- L'associativité : $(A \cap (B \cap C)) = (A \cap B) \cap C$ et $A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$
- La commutativité : $A \cap B = B \cap A$ et $A \cup B = B \cup A$

Comme dans la théorie des ensembles classiques, l'union et l'intersection possèdent également les propriétés suivantes, pour tous A et B de U :

- $A \cap U = A, A \cap \emptyset = \emptyset,$
- $A \cup \emptyset = A, A \cup U = U,$
- $A \cup B \supseteq A \supseteq A \cap B,$
- $A \cap (B' \cup B'') = (A \cap B') \cup (A \cap B''),$
- $A \cup (B' \cap B'') = (A \cup B') \cap (A \cup B''),$
- $|A| + |B| = |A \cap B| + |A \cup B|.$

f) Complément

Le complément AC d'un sous-ensemble flou A de U est tel qu'un élément u de U appartient d'autant plus à AC qu'il appartient peu à A . Ce complément AC est défini comme le sous-ensemble flou de U , de fonction d'appartenance :

III.2.4 Principe d'extension de Zadeh

En 1975, Zadeh introduit un nouveau principe dans le cadre de la théorie des ensembles flous. Ce principe permet de mieux prendre en compte les relations entre deux sous-ensembles flous, lorsque les données sont imparfaites [17] [19].

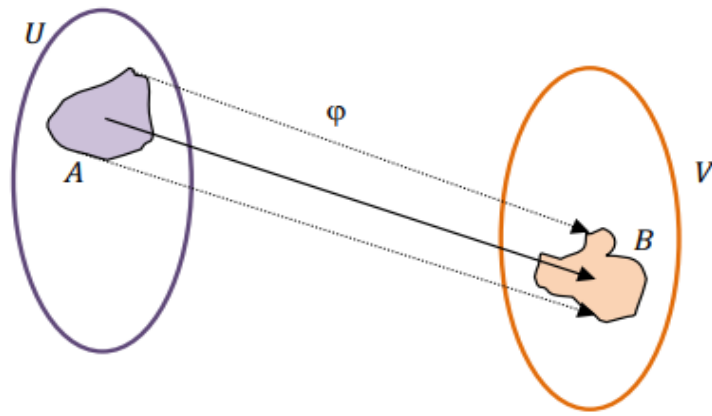


Figure III.6 : Principe d'extension de Zadeh.

L'objectif du principe d'extension est de trouver une application pouvant relier les deux sous-ensembles flous A et B de U et V .

Etant donné un sous-ensemble flou A de U et une application φ de U vers V , le principe d'extension permet de définir un sous-ensemble B de V associé à A par l'intermédiaire de φ :

$$\forall v \in V = \begin{cases} Ub(v) = \sup(u \in U ; v = \varphi(u)) Ua(u) ; & \text{Si } \varphi^{-1}(v) \neq \emptyset \\ Ub(v) = 0 & ; \text{Si } \varphi^{-1}(v) = \emptyset \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Pour illustrer ce principe, nous représentons dans un premier temps un graphique montrant l'image B du sous-ensemble ordinaire A de U par l'application (u) .

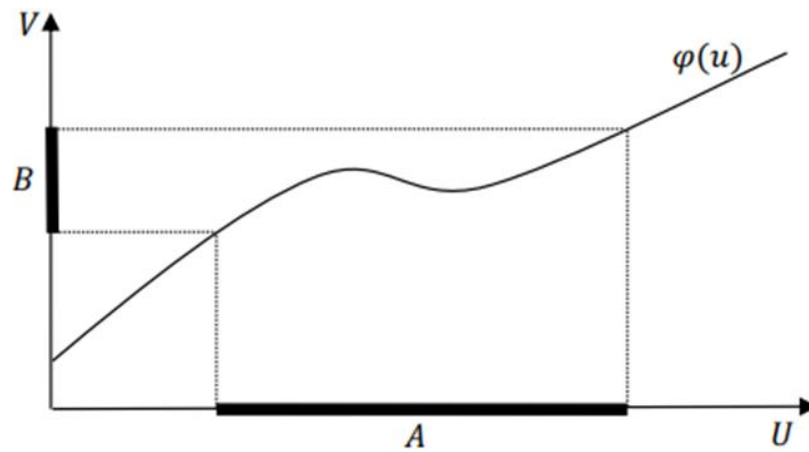


Figure III.7 : Image d'un sous-ensemble ordinaire.

III.3 La commande floue

La commande floue est caractérisée par une structure en trois étapes expliquées plus en détails ci-dessous.

III.3.1 première étape : la fuzzification

Le premier module traite les entrées du système. Nous procédons tout d'abord à la partition en sous-ensembles flous des différents univers de discours (ou référentiels) que le système impose, et à la détermination des fonctions d'appartenance pour chacune de ces entrées. Nous appelons cette étape, permettant de transformer une entrée réelle en un sous-ensemble flou, la fuzzification. Ensuite nous déterminons la base de règles qui va caractériser le fonctionnement désiré du système [20].

Exemple : « Un homme mesure 1m625 » donc il est « petit » à un degré de 75% et « moyen » à 25%. La partition floue de l'univers du discours serait donc :

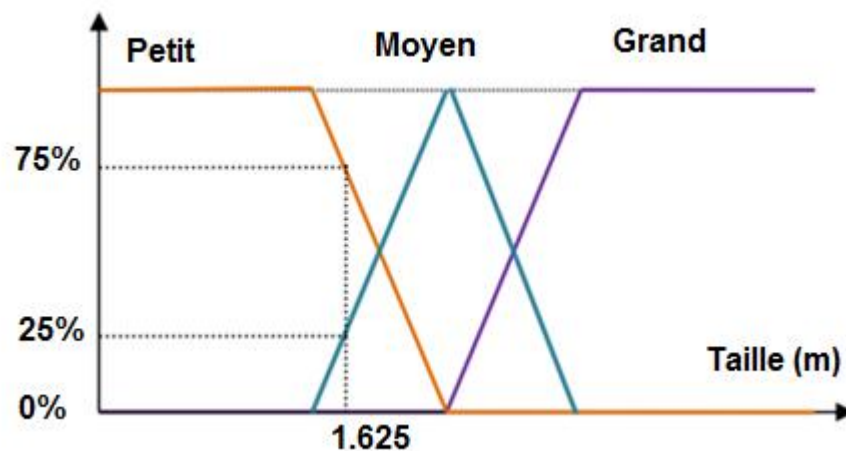


Figure III.8 : Partition de l'univers liée à la taille d'un homme.

En effet, la taille d'une valeur de 1m625 coupe les fonctions d'appartenance en :

- 75% pour la notion de « petit »,
- 25% pour la notion de « moyen »,
- 0% pour la notion de « grand ».

III.3.2 La deuxième étape : le mécanisme d'inférence

Le deuxième module consiste à utiliser les variables floues dans un mécanisme d'inférence qui crée et détermine les variables floues de sortie en appliquant les règles développées auparavant. Une des mises en pratique d'inférence couramment utilisée est celle de Mamdani. Elle peut être décrite par l'enchaînement de 3 phases :

- L'agrégation : évaluation des conditions associées aux règles d'inférence, l'union étant caractérisée par l'opérateur de maximisation et l'intersection par la minimisation.
- L'activation : évaluation de chaque règle d'inférence, et application de la relation d'inférence de Mamdani.

$$\mu'conclusion(y) = \min(\mu'prémisse(xi), \muconclusion(y)), \quad (III.10)$$

Avec $\mu'prémisse(xi)$ le degré d'activation suite à l'agrégation des conditions avec les opérateurs de maximisation et de minimisation.

Cette étape d'activation peut également utiliser la méthode de Larsen qui, au lieu de tronquer les fonctions d'appartenance, va prendre une réduction de la fonction d'appartenance de conclusion en question proportionnellement au degré d'activation de la règle :

$$\mu'conclusion(y) = \mu'prémisse(xi) \times \muconclusion(y). \quad (III.11)$$

- L'agrégation des conclusions : obtention de la fonction d'appartenance finale à partir du maximum des fonctions d'appartenance pour chaque y.

$$\mu'finale(y) = \max(\mu'conclusion(y)). \quad (III.12)$$

Pour continuer notre exemple, les deux premières étapes d'agrégation et d'activation peuvent être illustrées à l'aide des graphiques suivants. Si notre client considère que le service n'était pas très bon, sur une échelle de notation de 0 à 10, la valeur d'entrée pourrait donc être de 3. En ce qui concerne la nourriture, le consommateur la trouve plutôt bonne, ce qui peut correspondre à une note d'entrée de 8 sur 10. Ainsi, à l'aide de ces informations

d'entrées, nous pouvons en déduire la fonction d'appartenance de la conclusion sur le montant du pourboire pour chaque règle [17] [19] :

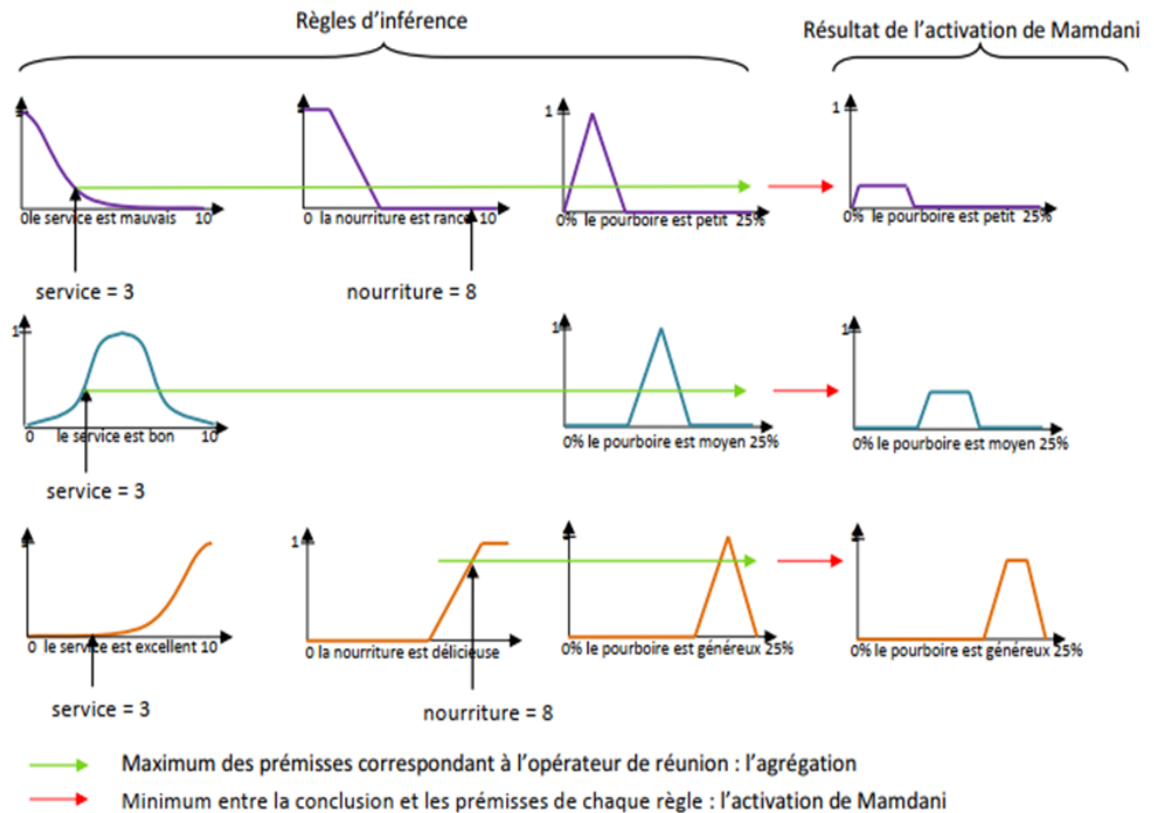


Figure III.9 : Inférence de Mamdani : étapes de l'agrégation et de l'activation.

La dernière étape d'agrégation des conclusions utilise le critère de maximisation, cela donne le μ_{finale} suivant :

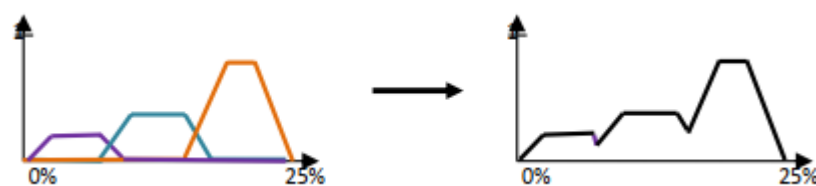


Figure III.10 : Inférence de Mamdani étape de l'agrégation des conclusions.

III.3.3 La troisième étape : la défuzzification

Enfin, vient la défuzzification qui consiste à extraire une valeur réelle de sortie à partir de la fonction d'appartenance du sous-ensemble flou de sortie établie par le mécanisme d'inférence. Il existe quatre principales techniques de défuzzification :

- La méthode la plus simple et la plus approximative est de prendre en compte le premier maximum de la fonction μ_{finale} .

- La deuxième est de considérer la moyenne des maximums de la fonction (moyenne des valeurs de sortie les plus vraisemblables).
- La troisième méthode est l'extraction barycentrique de la valeur y_0 , qui consiste à faire une moyenne des valeurs du référentiel pondérées par leur degré d'appartenance. Cette méthode est encore peu coûteuse en calculs et donne de bons résultats.
- La dernière méthode, qui est de loin la plus utilisée, est celle qui consiste à prendre en compte le centre de gravité de la surface délimitée par la fonction d'appartenance[17].

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les notions de base de la logique floue ainsi que la composition d'un système de commande floue. Les notions fondamentales du raisonnement flou ont été éclaircies en expliquant comment s'effectue la déduction des nouvelles informations à partir des informations déjà disponibles à base des règles linguistiques et nous avons vu les variables linguistiques qui permettent de traiter ces deux informations initialement très différentes et cela va permettre de créer des systèmes intelligents de manière facile ensuite la commande floue. Cette méthode suit toujours le même schéma en trois étapes, à savoir, la fuzzification, l'inférence puis la défuzzification. Le mécanisme d'inférence utilise la plupart du temps l'agrégation de Mamdani, même s'il existe d'autres méthodes telles que la méthode de Larsen.

CHAPITRE IV

SIMULATION ET RESULTATS

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va implémenter deux types de régulateur : un régulateur PID classique et PID intelligent (logique floue) de type Mamdani pour différents systèmes représentés par des fonctions de transfert , pour un seul objectif est d'annuler l'erreur statique, diminuer le dépassement, diminuer le temps de réponse et le temps de montée afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation et d'avoir un système précis, rapide, stable et robuste. A la fin on va faire une comparaison entre les deux commandes et déduire la mieux adaptée.

IV.2. Système de 1^{er} ordre

IV.2.1 Étude le système avec le contrôleur PID

On suppose que le système ayant une fonction de transfert suivant: $H(s) = \frac{1}{144s+1}$

Pour faire cette étude nous utilison les paramètres de PID suivant : $K_p = 3.5$; $K_i = 0.5$;

$K_d = 1$.

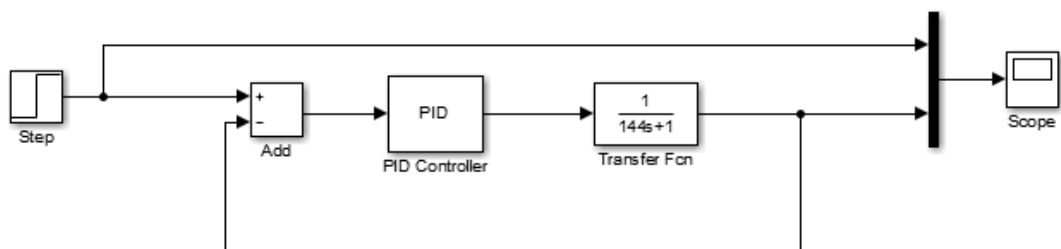


Figure. IV.1: Schéma bloc du système de 1^{er} ordre régulé par un PID.

Après simulation du schéma fonctionnel et on a trouvé les résultats suivants :

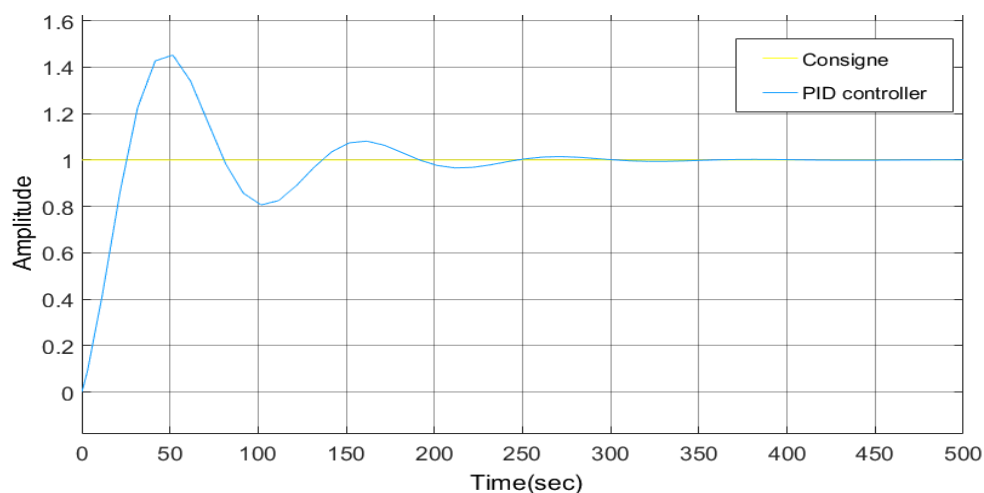


Figure. IV.2: La réponse du système de 1^{er} ordre commandé par PID.

La réponse du système présente une erreur importante, malgré que le temps de réponse est court ainsi que le système est stable dans le régime permanent.

IV.2.2 Étude le système avec le contrôleur FLOU

On remplace le contrôleur PID de schéma de la figure IV.1 par un contrôleur flou.

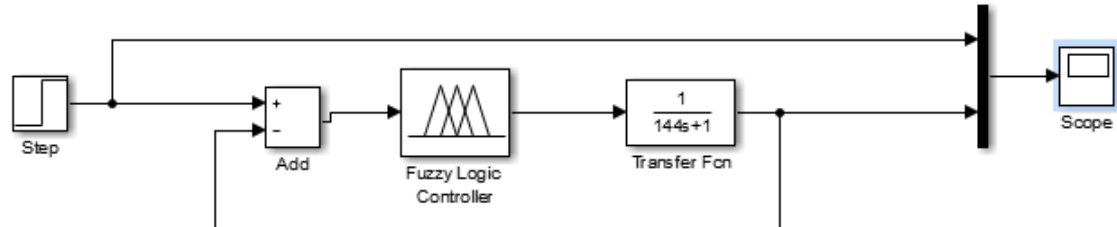


Figure. IV.3: Schéma bloc du système de 1^{er} ordre régulé par un régulateur flou.

Nous avons synthétisé le régulateur à logique Floue du type MAMDANI pour le réglage de se système, On commence tout d'abord par définir les entrées et les sorties, et par la suite on va essayer de lier les fonctions d'appartenances d'une façon logique afin de réponde au cahier des charges.

L'entrée (Erreur) a été partitionnée en 5 valeurs linguistiques triangulaires et symétrique, Elle peut être sur un intervalle de [-2,2] comme pour le système de premier ordre.

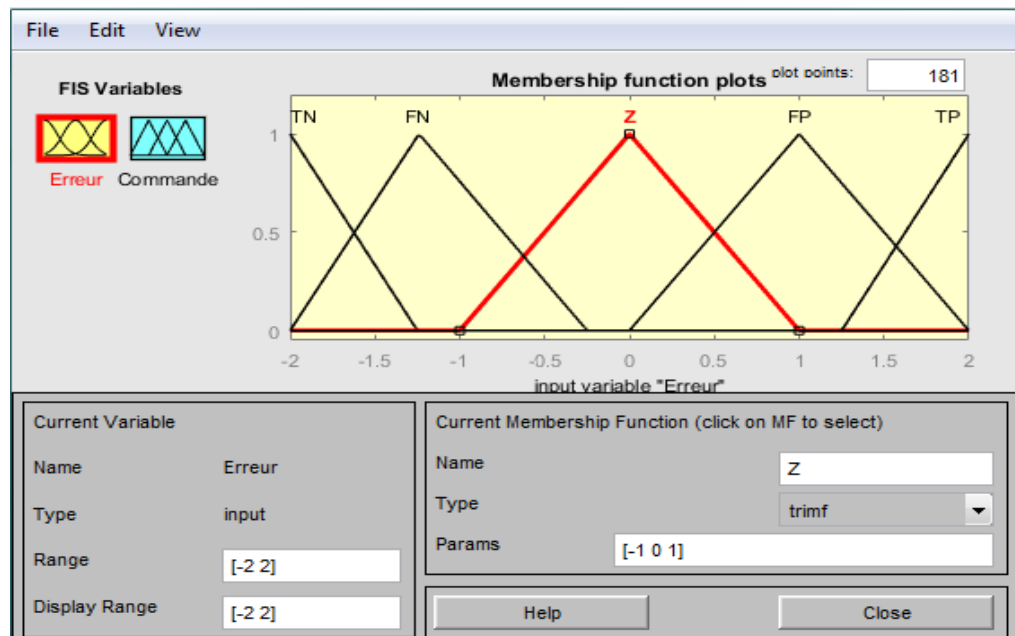


Figure. IV.4: Fuzzification de l'entrée du contrôleur flou.

La sortie (Commande) a été partitionnée en 5 valeurs linguistiques triangulaire et symétrique, Elle peut être sur un intervalle de [-9,11].

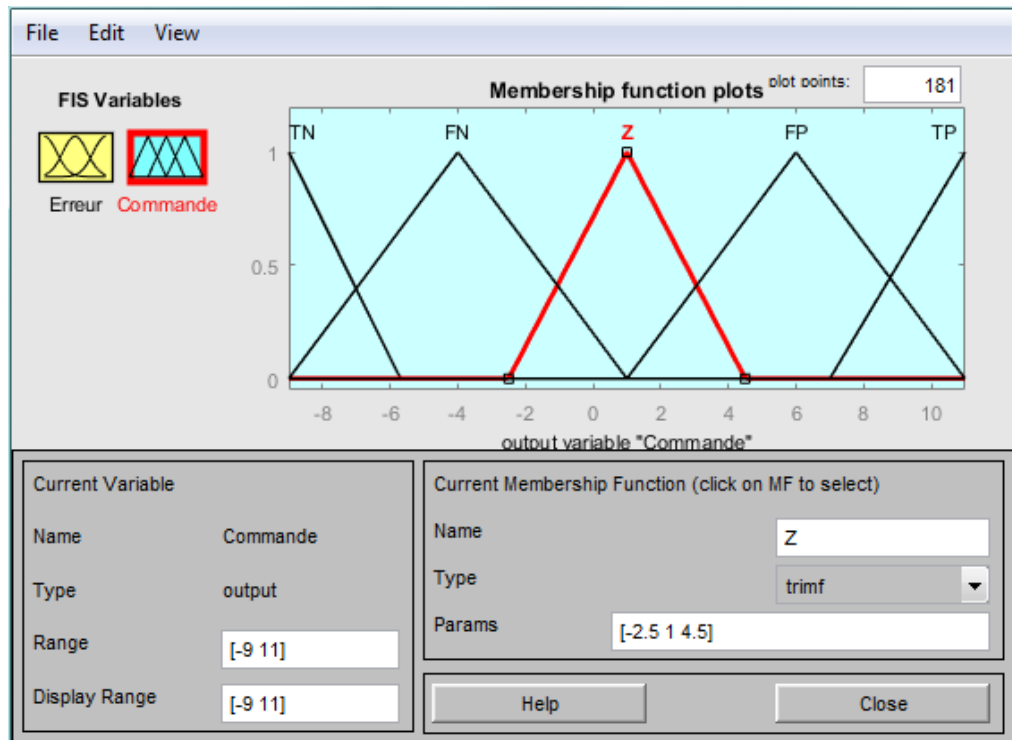


Figure. IV.5: Fuzzification de la sortie du contrôleur flou.

Les règles d'inférences seront alors définies comme suit :

R1 : SI (Erreur) est TN ALORS (Commande) est TN

R2 : SI (Erreur) est FN ALORS (Commande) est FN

R3 : SI (Erreur) est Z ALORS (Commande) est Z

R4 : SI (Erreur) est FP ALORS (Commande) est FP

R5 : SI (Erreur) est TP ALORS (Commande) est TP

Signification des variables linguistiques dans le système d'inférence floue :

- **TN** : très négatif .
- **FN** : faible négatif
- **Z** : zéro
- **FP** : faible positif
- **TP** : très positif

Après simulation, cela nous a permis d'obtenir la réponse suivante :

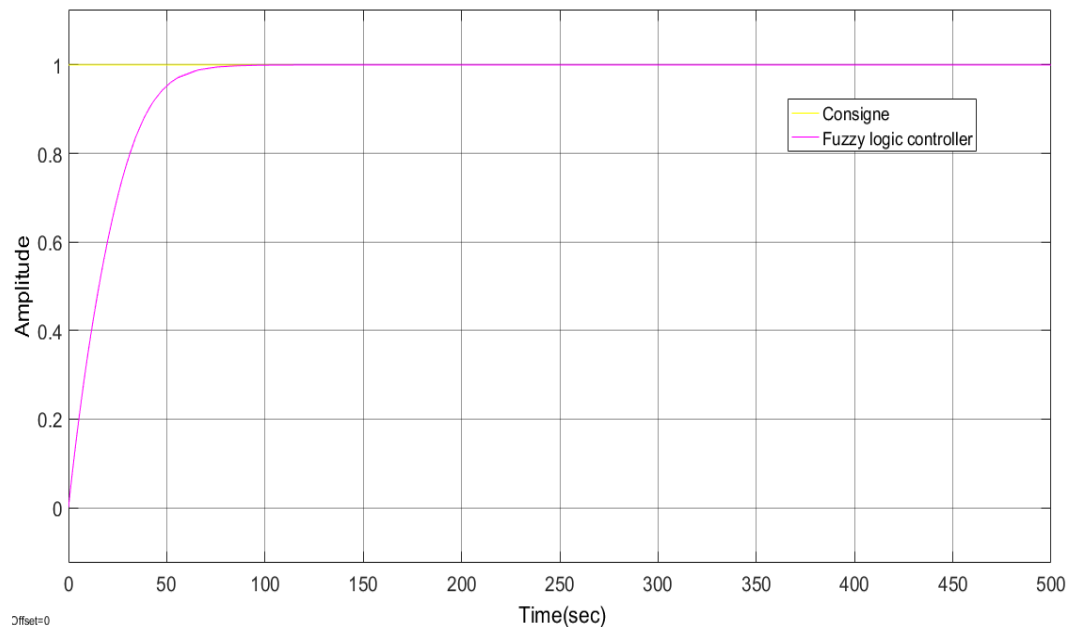


Figure. IV.6: La réponse du système de 1^{er} ordre commandé par un régulateur flou.

On remarque que le temps de réponse est court, l'absence de dépassement et d'erreur dans la réponse du système.

IV.2.3 Comparaison entre les deux régulateurs

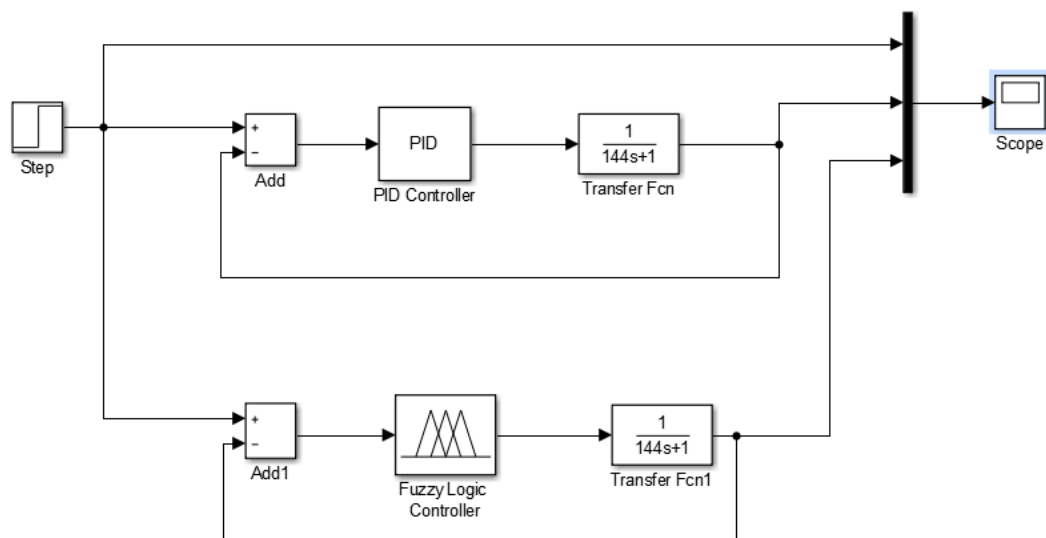


Figure. IV.7: Schéma bloc de système du 1^{er} ordre commandé par le PID et le contrôleur flou.

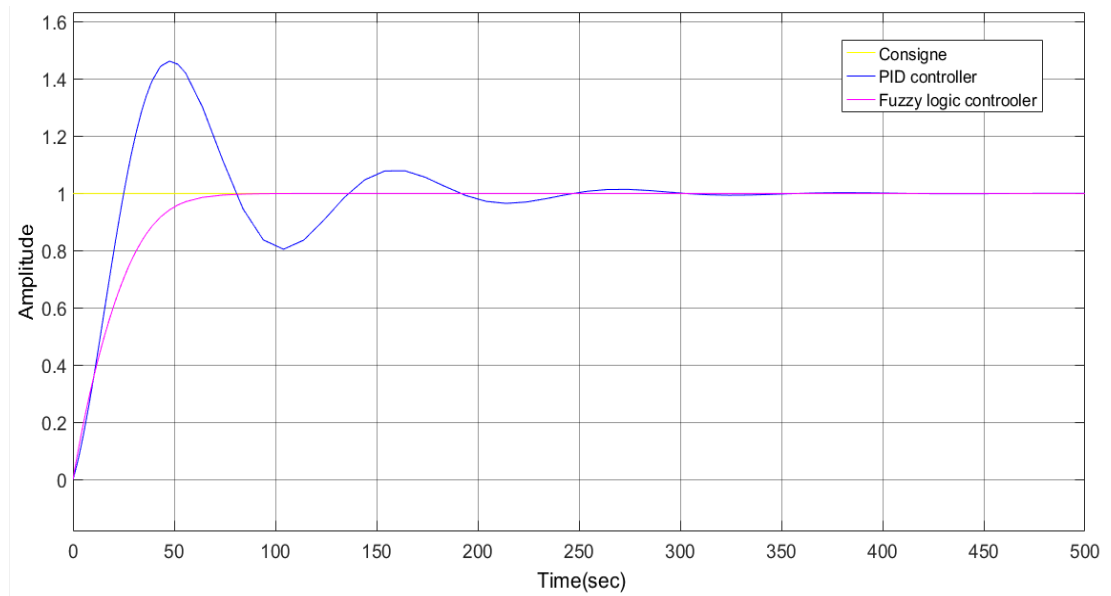


Figure. IV.8: La réponse du système du 1^{er} ordre.

Les spécifications du domaine temporel de performance sont maintenant calculées en observant la Figure IV.8. Celles-ci sont comparées et tabulées comme indiqué dans le Tableau suivant :

Tableau IV.1: Résultat d'un système de 1^{er} ordre.

Contrôleur utilisé	Paramètre de performance		
	Temps de réponse (s)	Temps de montée (s)	Dépassement (%)
PID	213	400	45
Logique floue	50	75	0

IV.3 Système de 2^{ème} ordre : Contrôle de la vitesse d'un moteur à courant continu

IV.3.1 Modélisation du Système d'un moteur à courant continu

Le terme contrôle de vitesse désigne une variation de vitesse intentionnelle effectuée manuellement ou automatiquement sur des moteurs à courant continu. conviennent le mieux au contrôle de la vitesse à large plage et sont là pour de nombreux variateurs de vitesse.

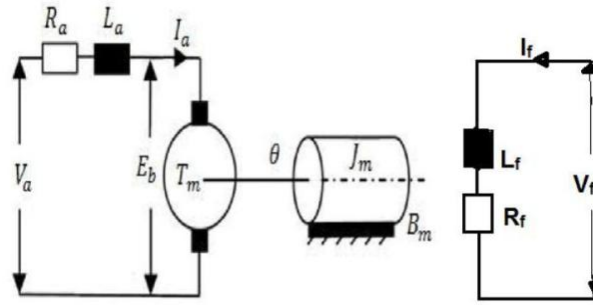


Figure. IV.9 : Schéma équivalent d'un moteur à courant continu.

L'équation de la tension d'induit est donnée par :

$$V_a = E_b + I_a R_a + L_a \left(\frac{dI_a}{dt} \right) \quad (\text{IV.1})$$

L'équation d'équilibre du couple sera donnée par :

$$T_m = J_m \left(\frac{d\omega}{dt} \right) + B_m \omega + T_L$$

Le frottement dans le rotor du moteur est très faible (peut être négligé), donc $B_m = 0$. Par conséquent, la nouvelle équation d'équilibre de couple sera donnée par :

$$T_m = J_m \left(\frac{d\omega}{dt} \right) + T_L$$

Prenant le flux de champ comme Φ et la constante de Force contre électromotrice comme K .

L'équation pour la force contre électromotrice du moteur sera :

$$E_b = K \Phi$$

Aussi,

$$T_m = K \Phi I_a$$

Prendre la transformée de Laplace du moteur équation de tension d'induit que nous obtenons :

$$I_a(s) = (V_a - E_b)/(R_a + L_a s) \quad (IV.2)$$

Après avoir simplifié le modèle de moteur ci-dessus, l'ensemble la fonction de transfert sera :

$$\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K\Phi}{L_a J_m s^2 + R_a J_m s + K^2 \Phi^2} \quad (IV.3)$$

V_a : la tension d'induit (Volt)

θ : la vitesse de rotation

E_b : force contre électromotrice (Volt)

I_a : Le courant d'induit (Ampère)

R_a : la résistance d'induit (Ohm)

L_a : l'inductance d'induit (Henry)

T_m : le couple mécanique développé (Nm)

J_m : le moment d'inertie (Kg/m²) (rad/sec)

B_m : le coefficient de frottement du moteur (Nms)

ω : la vitesse angulaire

Les valeurs numériques du MCC :

$V_a = 200 \text{ V}$, $R_a = 0.5 \Omega$, $L_a = 0.02 \text{ H}$, $J_m = 0.1 \text{ Kg/m}^2$, $B_m = 0.008 \text{ N.m/rad/sec}$,

Constante de couple moteur = 0.5 N.m/A

la constante de Force contre électromotrice $K = 1.25 \text{ V/rad/sec}$

Après le calcul, le moteur à courant continu est modélisé par la fonction du transfert suivante :

$$H(p) = \frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{0.5}{0.002s^2 + 0.05s + 0.625}$$

IV.3.2 Étude le système avec le contrôleur PID

Pour faire cette étude nous utilison les paramètres de PID suivant : $K_p = 6.6$; $K_i = 165$; $K_d = 0.066$, Les paramètres du système simulé sont : Step (consigne)=1

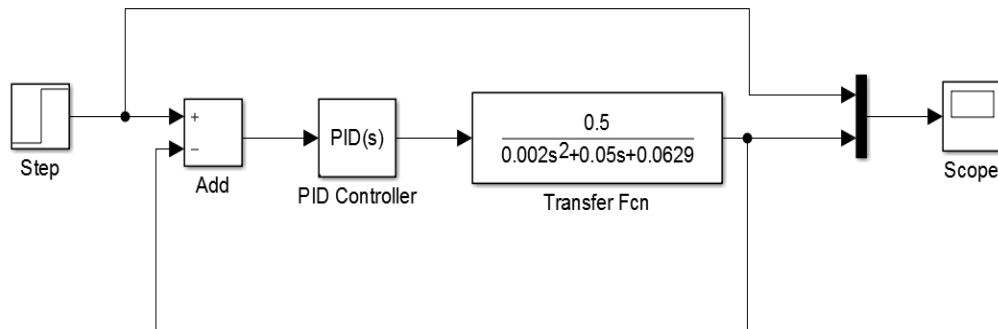


Figure. IV.10: Schéma bloc du système de 2^{ème} ordre régulé par un PID.

La sortie de simulation du régulateur PID pour Le système du 2^{ème} ordre est représenté sur la figure suivant :

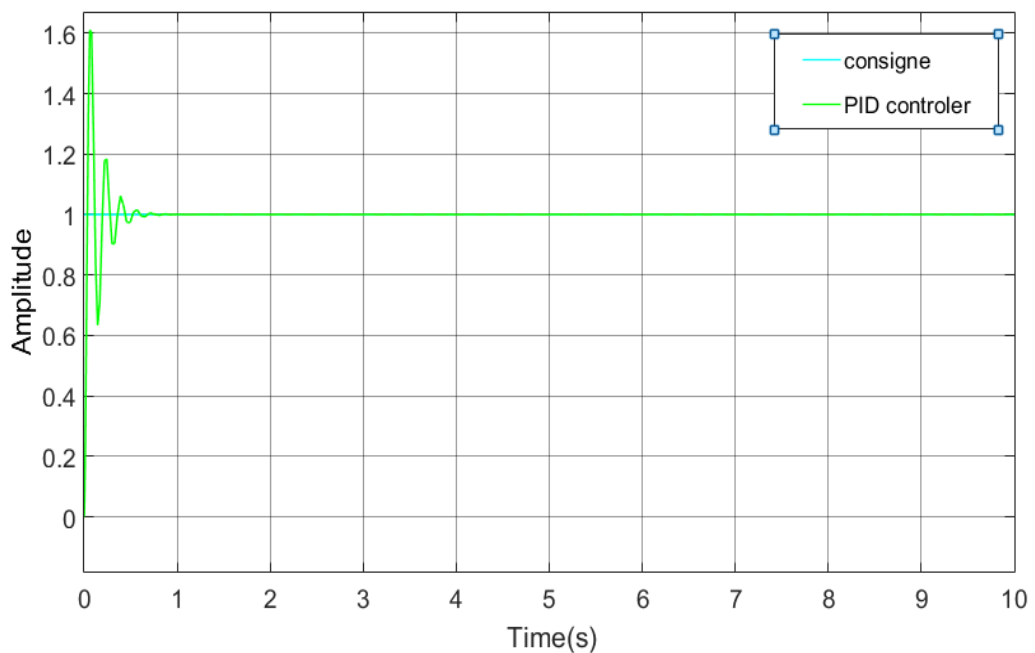


Figure. IV.11: Réponse indicielle du système de 2^{ème} ordre régulé par un PID.

Comme on peut le voir sur la figure, La réponse du système a un dépassement considérablement élevé et des valeurs de temps de stabilisation plus grandes.

IV.3.3 Étude le système avec la commande floue

On considère alors le système avec contrôleur flou présenté dans la figure IV.12.

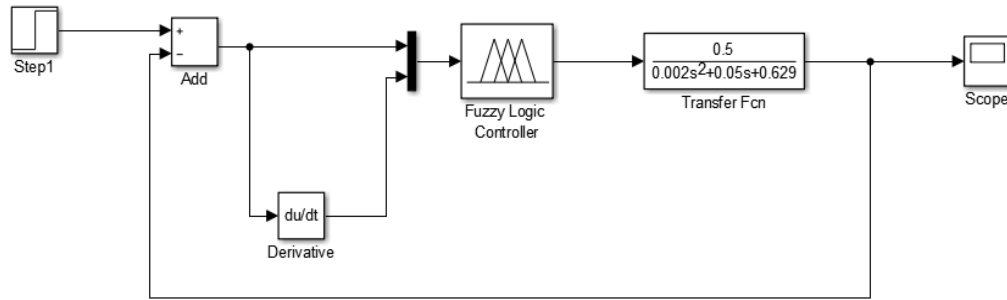


Figure. IV.12: Schéma bloc de système de 2^{ème} ordre commandé par le contrôleur flou.

Pour la conception de notre régulateur flou, on va exploiter trois variables, l'erreur (notée **Erreur**), mais aussi la dérive de l'erreur (notée **Derreur**), et la sortie (notée **commande**).

L'erreur du régulateur flou a été partitionnée en 3 valeurs linguistiques triangulaire et symétrique dans un intervalle de [0 : 0.2].

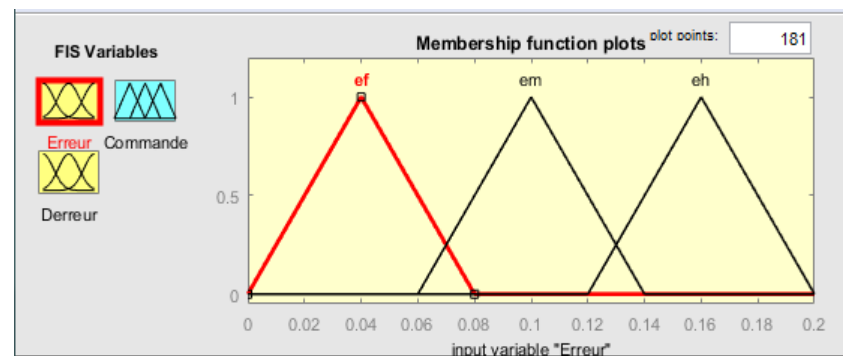


Figure. IV.13: Fuzzification de l'erreur du contrôleur flou.

Le dérivé de l'erreur dans le régulateur flou a été aussi partitionné en 3 valeurs linguistiques triangulaire et symétrique dans un intervalle de [0 : 0.8].

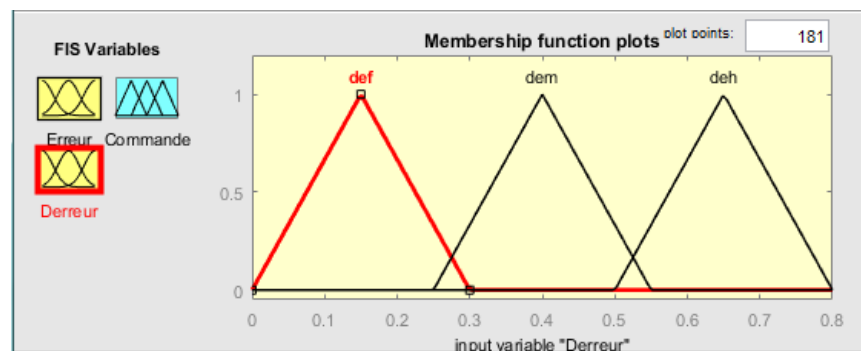


Figure. IV.14: Fuzzification de la dérive d'erreur du contrôleur flou.

La commande du régulateur flou a été également partitionnée en 5 valeurs linguistiques triangulaire et symétrique dans un intervalle de $[0 : 0.8]$.

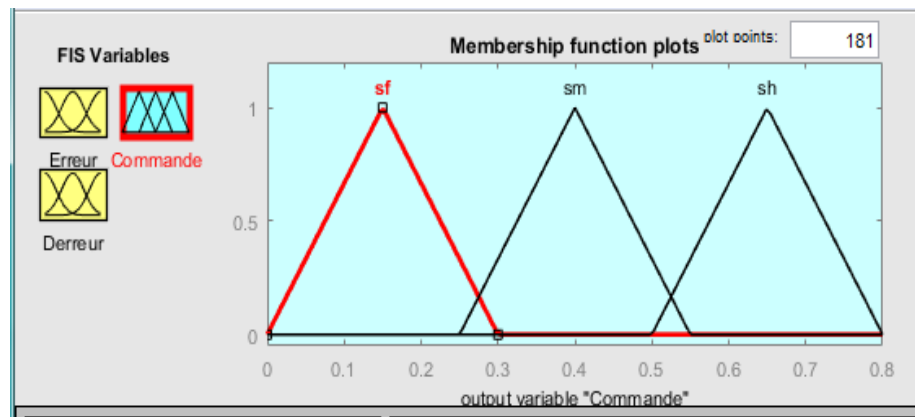


Figure. IV.15: Fuzzification de la commande du contrôleur flou.

Les règles d'inférences définies dans le tableau suivant:

Tableau IV.2 : Tableau des règles de la logique floue utilisés pour la conception du régulateur flou.

dE \ E	def	dem	deh
ef	sf	sm	sm
em	sf	sm	sh
eh	sm	sm	sh

Signification des variables linguistiques dans le système d'inférence floue :

- **ef** : erreur faible
- **em** : erreur moyen
- **eh** : erreur haut
- **def**: dérive d'erreur faible
- **dem**: dérive d'erreur moyen
- **deh**: dérive d'erreur haut
- **sf**: sortie de commande est faible
- **sm**: sortie de commande est moyen
- **sh**: sortie de commande est haut

Après simulation du schéma fonctionnel qui représente dans la figure (IV.12) on a trouvé les résultats suivants :

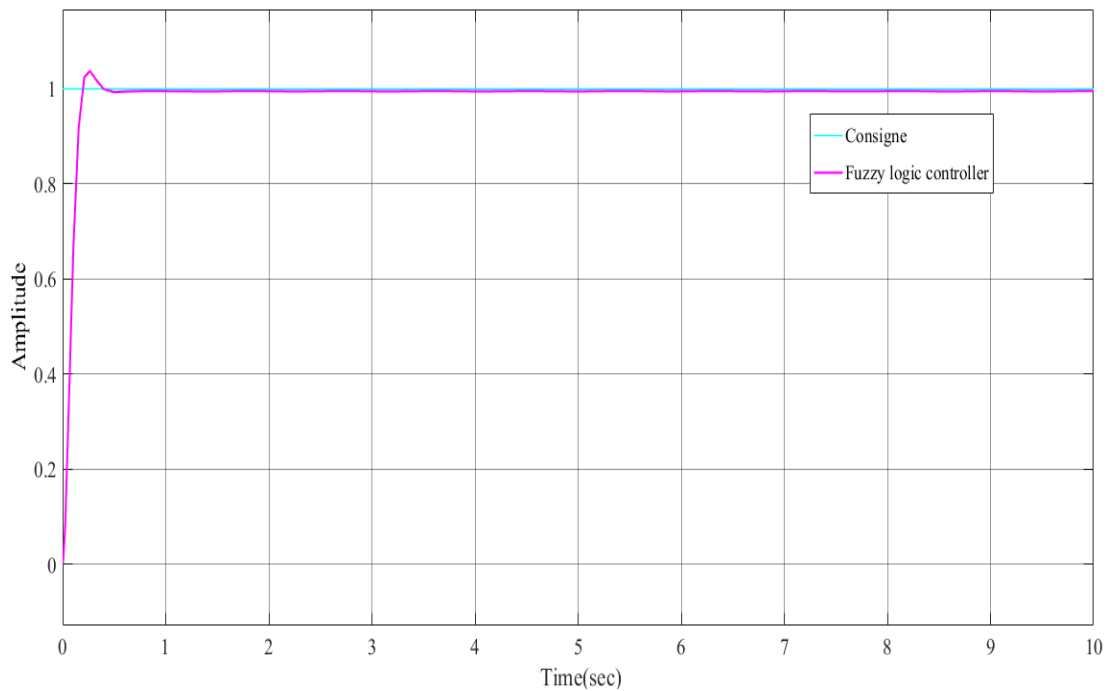


Figure. IV.13: Réponse indicielle du système de 2^{ème} ordre commandé par le contrôleur flou.

D'après la figure ci-dessus, on peut facilement voir que le dépassement a été considérablement réduit avec le contrôleur à logique floue par rapport à la régulateur PID.

IV.3.4 Comparaison entre les deux régulateurs

Schéma bloc de simulation

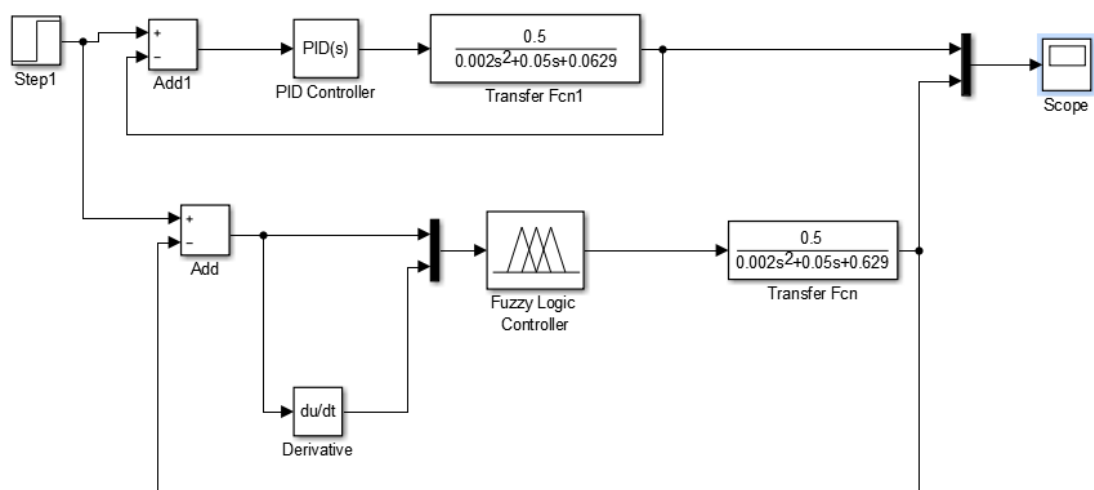


Figure. IV.14: Schéma bloc de système du 2^{ème} ordre commandé par le PID et le contrôleur flou.

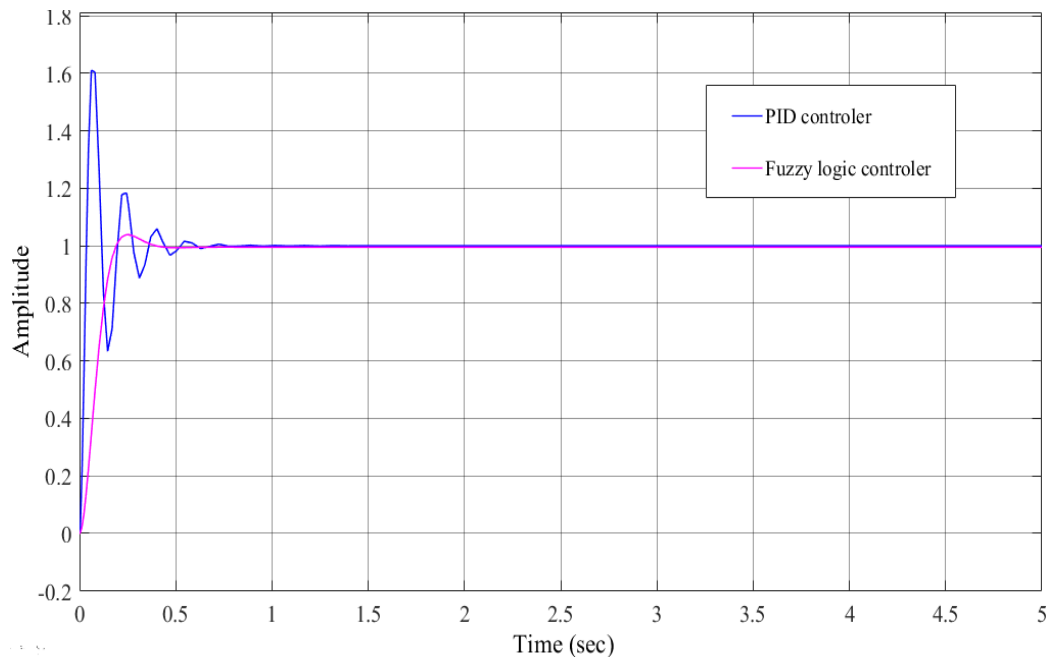


Figure. IV.15: La réponse système du 2^{ème} ordre .

une comparaison a été faite entre les dépassements ,les temps de montée et temps de réponse comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau IV.3: Résultat d'un système de 2^{ème} ordre.

Contrôleur utilisé	Paramètre de performance		
	Temps de réponse (s)	Tems de montée (s)	Dépassement (%)
PID	0.5	0.75	60
Logique floue	0.20	0.4	5

IV.4. Système de 3^{ème} ordre

IV.4.1 Étude le système avec le contrôleur PID

Le système concerné est caractérisé par la fonction de transfert suivante :

$$H(p) = \frac{6}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6}$$

Le système est étudié en boucle fermée avec et sans PID. Les paramètres du système simulé sont : Step1=1 ; Paramètres du PID : $K_p = 5$, $K_i = 3$, $K_d = 2$

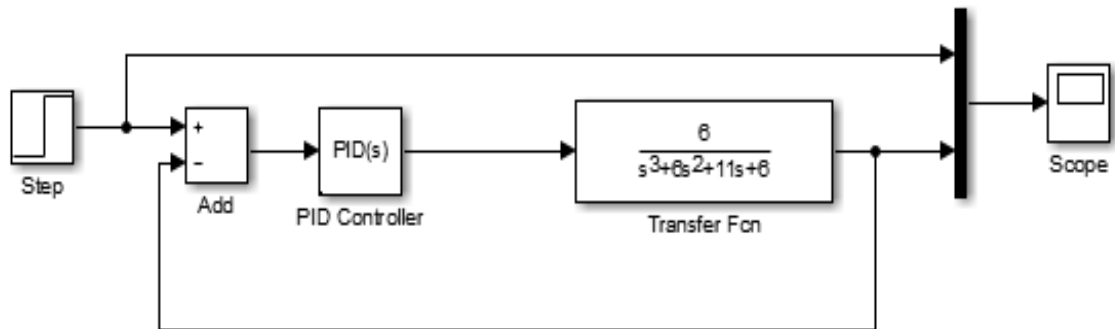


Figure. IV.16: Schéma bloc du système de 3^{ème} ordre régulé par un PID.

Le schéma de la figure (IV.16) est réalisé sous Matlab- SIMULINK. Les résultats trouvés sont les suivants :

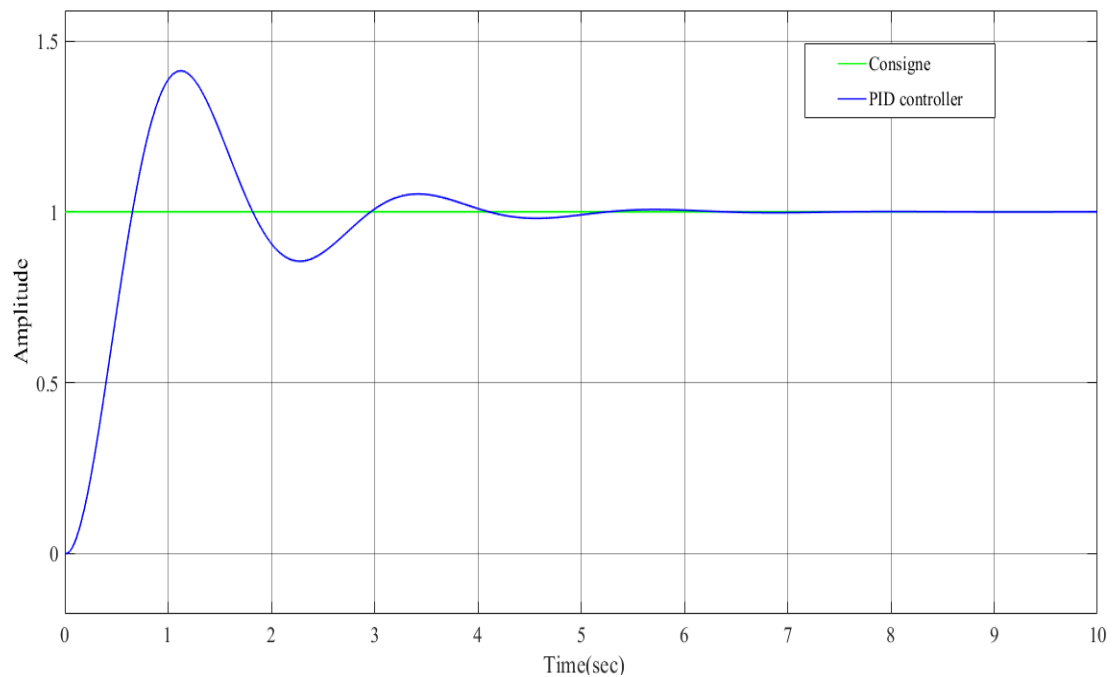


Figure. IV.17: La réponse du système de 3ème ordre commandé par PID.

IV.4.2 Étude le système avec le contrôleur flou

Schémas de simulation

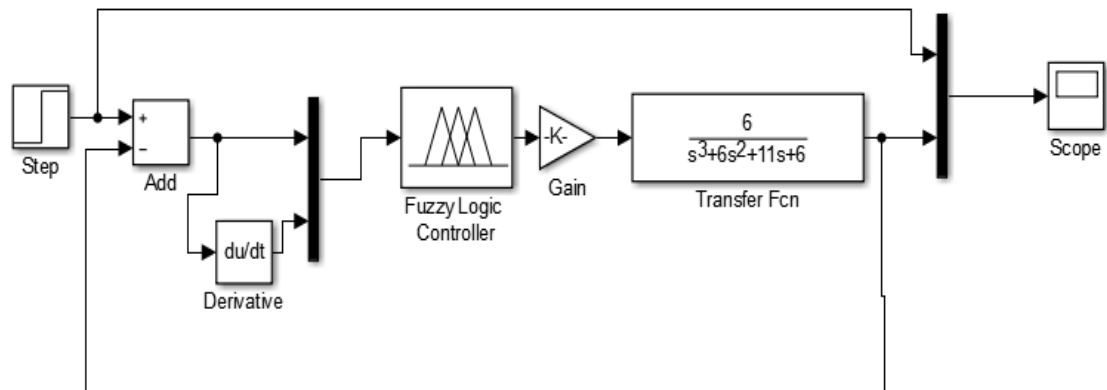


Figure. IV.18: Schéma bloc de système de 3^{ème} ordre commandé par le contrôleur flou.

Fonctions d'appartenances

L'erreur du régulateur flou a été partitionnée en 3 valeurs linguistiques triangulaire et symétrique dans un intervalle de [0 : 0.4].

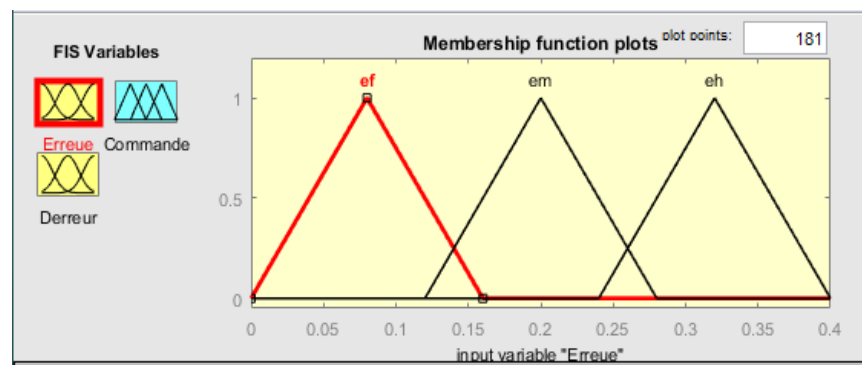


Figure. IV.19: Fuzzification de l'erreur du contrôleur flou.

Le dérivé de l'erreur dans le régulateur flou a été aussi partitionné en 3 valeurs linguistiques triangulaire et symétrique dans un intervalle de [0 : 0.7].

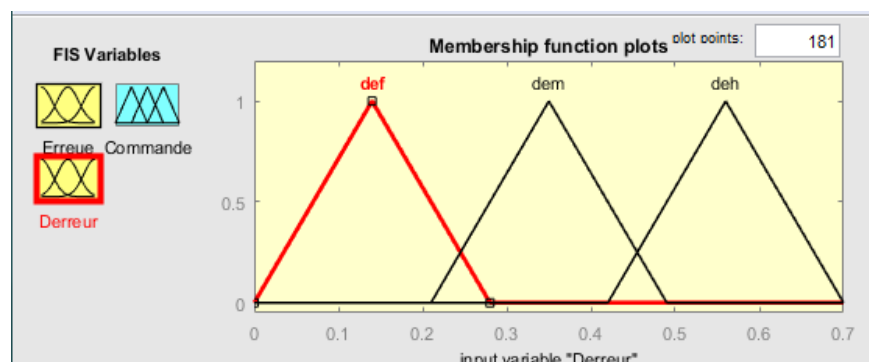


Figure. IV.20: Fuzzification de la dérive d'erreur du contrôleur flou.

La commande du régulateur flou a été également partitionnée en 3 valeurs linguistiques triangulaire et symétrique dans un intervalle de $[0 : 0.7]$.

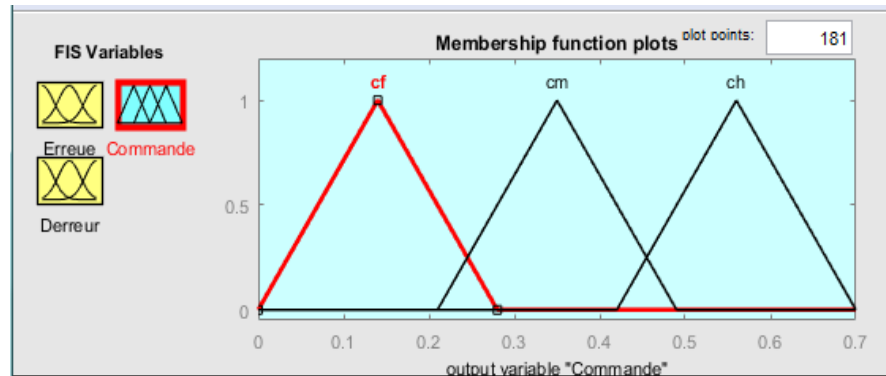


Figure. IV.21: Fuzzification de la commande du contrôleur flou.

Les règles d'inférences

Le tableau (IV.4) représente les règles de la logique floue que nous allons obtenir pour la conception de notre régulateur flou.

Tableau IV.4 : Tableau des règles floues du contrôleur flou.

	dE	def	dem	deh
E				
ef		cf	cm	cm
em		cf	cm	ch
eh		cm	cm	ch

Signification des variables linguistiques dans le système d'inférence floue :

ef : erreur faible.

def : dérive d'erreur faible.

em : erreur moyen.

sf : commande est faible.

eh : erreur haut.

sh : commande est haut.

dem : dérive d'erreur moyen.

sm : commande est moyen.

deh : dérive d'erreur haut.

La figure (IV.22) représente la réponse indicielle du régulateur à base de la logique floue.

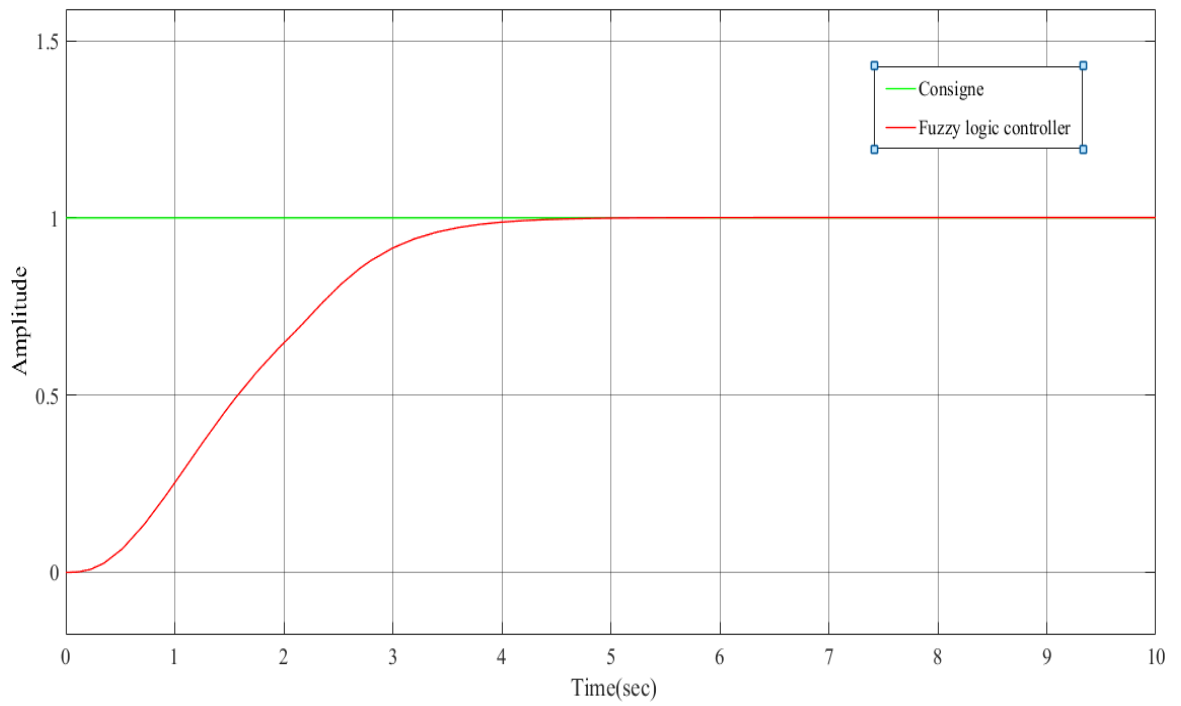


Figure. IV.22: La réponse système du 3^{ème} ordre commandé par le contrôleur flou.

IV.4.3 Comparaison entre les deux régulateurs

Schéma bloc de simulation

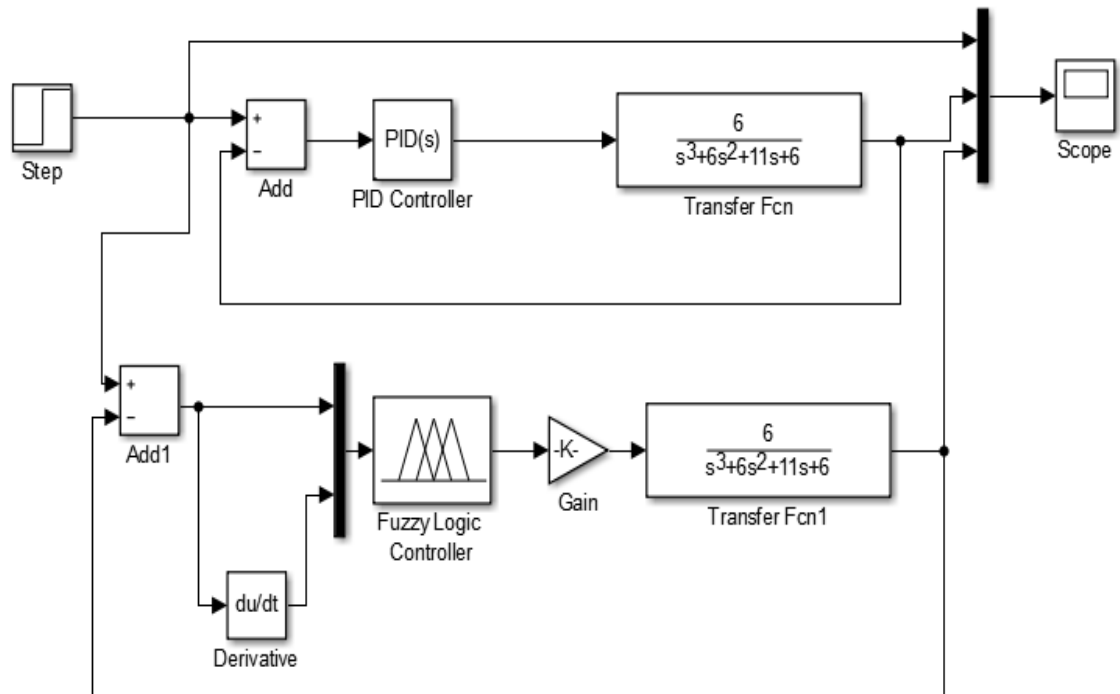


Figure. IV.23: Schéma bloc de système du 3^{ème} ordre commandé par le PID et le contrôleur flou.

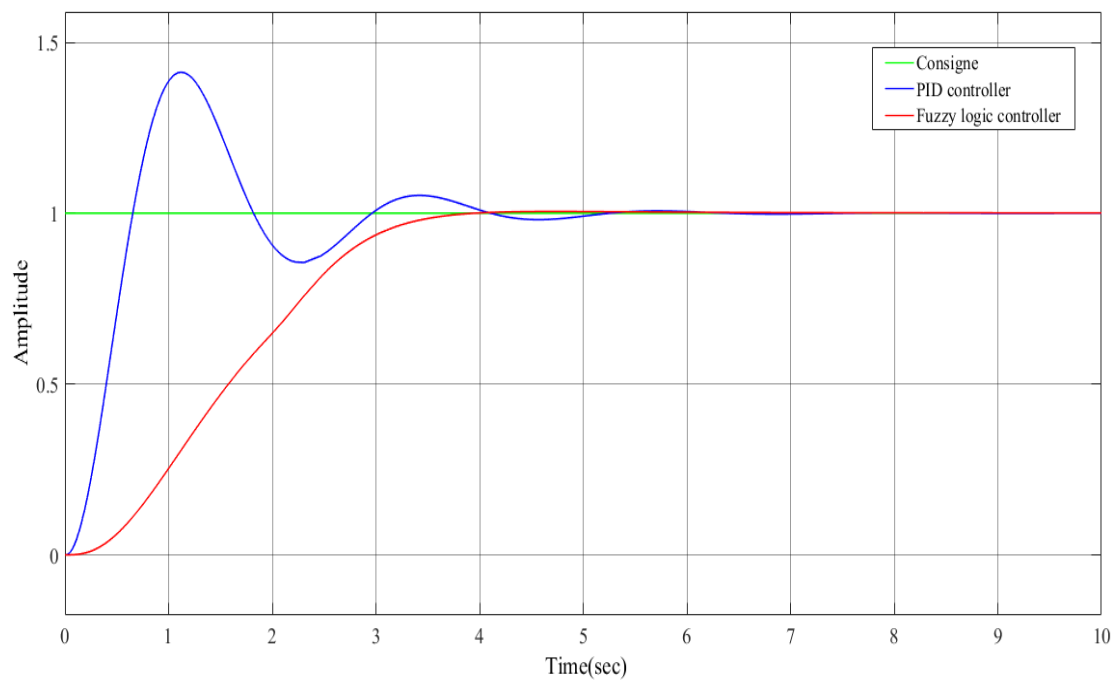


Figure. IV.24: La réponse système du 3^{ème} ordre.

une comparaison a été faite entre les dépassements ,les temps de montée et temps de réponse comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau IV.5: Résultat d'un système de 3^{ème} ordre.

Contrôleur utilisé	Paramètre de performance		
	Temps de réponse (s)	Tems de montée (s)	Dépassement (%)
PID	4.3	6.2	40
Logique floue	3.4	3.9	0

IV.5. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, on a appliqué les deux méthodes étudiées précédemment (la commande PID et la commande floue) sur plusieurs systèmes afin de faire notre étude comparative entre ces deux commandes. Nous avons fait des études comparatives en simulation pour réguler des systèmes de différents ordres (1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème} ordre).

Après simulation, on a obtenu les résultats précédents, ces derniers montrent que le régulateur flou donne de meilleures réponses par rapport au régulateur PID à savoir un temps de montée plus court, une bonne précision. Nous constatons que le choix convenable des fonctions d'appartenance permet d'obtenir des hautes performances avec le régulateur flou, par-apport au régulateur PID.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Nous avons présenté dans ce mémoire les méthodes de réglage et de la commande des systèmes industriels par régulateurs PID classiques et flous. Nous avons également détaillé la procédure de synthèse des correcteurs les plus communément utilisés en industrie.

L'objectif de notre travail est de présenter une étude comparative entre deux approches de réglage PID (classique et flou) et de simuler leur fonctionnement.

Le premier chapitre a permis de rappeler les généralités sur les systèmes asservis et les différentes performances d'un système, dans le deuxième chapitre nous avons présenté le concept fondamental de la commande classique conventionnelle à base des régulateurs PID est présenté. Nous avons cité ensuite les différents types du correcteur P, PI, PD et PID, leur principes de fonctionnement aussi que les différentes structures d'un régulateur PID (série, parallèle et mixte). Après, nous avons cité les différentes les méthodes de synthèse du régulateur PID puis on a détaillé le principe de la méthode de Ziegler –Nichols qui permet de calculer les bonnes valeurs de paramètre du correcteur PID.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté les principales méthodes utilisées pour concevoir un régulateur à base de logique floue ont été présentées. Après, nous avons illustré la structure élémentaire d'un contrôleur flou et on a précisé le rôle de chaque bloc (base des règles, moteur d'inférences floues, fuzzification, défuzzification)

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation des systèmes régulé par les deux types de régulateur précédent. Les résultats de simulation nous ont montré que le régulateur à base de la logique floue est caractérisé par de bonnes performances en termes de : stabilité, dépassement , temps de réponse égal et une bonne précision . Malgré les avantages du régulateur flou liés à sa mise en œuvre en comparaison avec le PID mais ce dernier reste encore le plus utilisé dans l'industrie.

Références bibliographiques

- [1] Dr. Aggoune Lakhdar. Systèmes Asservis. Université Ferhat Abbas Sétif 1 .Licence Électrotechnique (troisième année).
- [2] Régulation industrielle Auteurs: M.KSOURI et P.BORNE Editions Technip, Paris.
- [3] Bouakaz Massoud.2020.Introduction à la regulation. University Badji Mokhtar Annaba.
- [4] D. Arzelier, « Analyse des systèmes asservis », notes de cours, université de Toulouse, France 2013.
- [5] L'Institut d'Automatisation Industrielle (iAi) de l'eivd étudie Ajustage des Paramètres des Régulateurs PID "Freddy Mudry"
- [6] P.welander. 02/01/2010. Understanding derivative in pid control control engineering . Article
- [7] Christophe Le Lann, 2007, Le PID utilisé en régulation de position et/ou de vitesse de moteurs électriques, <http://www.totofweb.net/projets/pid/rapport.pdf>
- [8] Boukhris M. Régulation de vitesse d'une machine asynchrone, Université de Kasdi Merbah OURAGLA, Master en Electrotechnique (2014)
- [9] Régulateur PID en génie électrique Auteur: Dominique Jacob Ellipses, édition marketing S.A, 1999
- [10] Régulation classique en industrie, support de cours pour BTS-GM : conception et réalisation Mohamed BOUASSIDA, version Mai 2010
- [11] Asservissement et Régulation, Note de cours Moez ALLOUCHE et Ahmed BENAYED : ISET MAHDIA
- [12] K.Aström .1995.Hägglund. Pid controllers: theory, design and tuning.second edition.instrument society of America.

BIBLIOGRAPHIE

- [13] K.M. Passino, S. Yurkovich, and M. Reinfrank, "Fuzzy control," vol. 42: AddisonWesley, pp. 15-21 , 1998.
- [14] M. Smyej, "Conception d'un correcteur par logique floue pour un convertisseur cc/cc," Mémoire de maîtrise (M.Sc.A.), ed. Université du Québec à Trois-Rivières 2000.
- [15] <https://actudactuaires.typepad.com> ° ...PDF principe-de-la-logique-floue-1.pdf - Actu d'actuaires
- [16] <http://www8.umoncton.ca> › ...PDF Chapitre 11 – Logique
- [17] L'ORSA : Apport de la logique floue dans la modélisation des management actions en non-vie (Mémoire présenté en vue de la validation du cursus à la Formation d'Actuaire du Centre d'Études Actuarielles et l'admission à l'Institut des Actuaires par Cynthia BAZOGE & Alexandre DIAS LOPES Avril 2017).
- [18] Réalisation d'une bibliothèque de lois de commande adaptative pour MSAP Septembre 2015 (MÉMOIRE présente a L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES).
- [19] Talbi N. Conception des Systèmes d'Inférence Floue par des approches Hybrides : Application pour la Commande et la Modélisation des Systèmes Nonlinéaires. Thèse de Doctorat en Science, Université de Constantine 1. (2014).
- [20] <http://www.intitutesactuares.com/pdf/> la logique floue dane la modélisation.

Résumé

L'objectif visé dans ce travail est de faire une étude comparative entre deux de contrôleurs : l'un de type classique (PID) et l'autre intelligent (logique floue) et ceci afin de commander des plusieurs système.

Dans ce contexte, on applique les deux contrôleur à systemes différents on réaliser la simulation avec le logiciel "Matlab /SIMULINK". Les résultats de simulation que nous avons obtenus ont illustré l'efficacité de la controle flou à travers les caractéristiques de la réponse. Ce type de régulateur possède un meilleur temps de monté et une réponse rapide. Les résultats de simulation obtenus en variant le temps de retard montrent la robustesse du contrôleur floue.

Abstract

The objective of this work is to make a comparative study between two controllers: one of the classic type (PID) and the other intelligent (fuzzy logic) and this in order to control several systems.

In this context, we apply the two controllers to different systems, we carry out the simulation with the software "Matlab / SIMULINK" software. The simulation results we obtained illustrated the effectiveness of fuzzy control through the characteristics of the response. This type of regulator has a better rise time and a fast response. The simulation results obtained by varying the delay time show the robustness of the fuzzy controller.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو إجراء دراسة مقارنة بين اثنين من وحدات التحكم: أحدهما من النوع الكلاسيكي (PID) والآخر ذكي (المنطق الضبابي) وذلك من أجل التحكم في عدة أنظمة. في هذا السياق ، نقوم بتطبيق وحدتي التحكم على أنظمة مختلفة ، ونقوم بإجراء المحاكاة باستخدام البرنامج 'Matlab/SIMULINK'. أظهرت نتائج المحاكاة التي حصلنا عليها كفاءة التحكم الضبابي من خلال خصائص الاستجابة هذا النوع من المنظمين لديه وقت صعود أفضل واستجابة سريعة. تظهر نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها من خلال تغيير وقت التأخير مائة وحدة التحكم الضبابية .