

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

669



**Mémoire de fin d'étude
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie électrique
Spécialité : commande des machines électriques

Commande d'une sustentation électromagnétique

Présenté par : ziaya abdelhaq

Sous la direction de : Mr.debeche .M

JUIN 2011



Remerciement



Au terme de ce travail, nous voulons exprimer nos profondes gratitudees envers ALLAH le tout puissant qui grâce à son aide nous avons pu finir ce travail.

Nos vifs remerciements s'adressent à notre encadreur Monsieur Mr. Debeche Mehdi pour les taches qui nous a facilités et tous ses conseils et remarques durant l'élaboration de ce mémoire.

Je remercie tous les membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter de participer à cette soutenance.

Nos remerciements vont également à tous ce qui, de prés ou de loin, nous ont aidé au cours de notre projet.

Dédicace

*Nous dédions ce travail à nos parents, en
suit à tous nos frères et sœurs qui ont
toujours soutenues et encourages, et en fin
tous (toutes) nos ami(e)s.*

Résumé :

L'objectif de ce mémoire est l'utilisation de la force électromagnétique pour le déplacement de la masse M sans contact avec l'électro-aimant.

L'asservissement de cette application consiste à maintenir la masse M à une distance choisie x_0 , pour cela nous allons étudier l'asservissement de l'amplificateur du courant pour corriger le processus d'attraction électromagnétique, ainsi l'asservissement analogique et numérique de la position $x(t)$. Nous allons utiliser un régulateur flou qui comporte 2 entrées, $e(t)$ représentant l'écart entre la consigne de position et la mesure de celle-ci et $de(t)$ dérivée de $e(t)$ permettant ainsi au régulateur flou la correction de l'erreur statique.

Introduction générale 1

Chapitre I
Logique floue

I.1- Introduction3
I.2- théorie de la logique floue4
I.3-Les différents domaines d'applications.....5
I.4- Les concepts.....6
I.4.1-Sous-ensemble flou.....6
I.4.2-Variable linguistique.....8
I.4.3-Opérateurs de la logique floue.....9
 I.4.3.1-L'opérateur NON (complément).....9
 I.4.3.2 -L'opérateur ET (intersection).....10.
 I.4.3.3- L'opérateur OU (union)10
I.4.4-Fonction d'appartenance11
I.5-Conclusion.....12

Chapitre II
Commande PID CLASSIQUE

II.1-Introduction.....13
II.2-Principe général13
 II.2.1-Trois facteurs: P, I et D.....13
 II.2.1.1-Le facteur proportionnel: P.....13
 II.2.1.2-Le facteur intégral: I.....13
 II.2.1.3-Le facteur dérivé: D.....14
II.3-Réglage d'un PID.....15

Chapitre III
Commande floue

III.1-Introduction	18
III.2- Propriétés d'une commande par logique floue	19
III.3- Structure d'un régulateur flou.....	19
III .3.1- Interface de fuzzification.....	20
III.3.2- Base de connaissances.....	21
III.3.3- Moteur d'inférence floue.....	22
III.3.3.1- Méthode d'inférence max-min	22
III.3.3.2- Méthode d'inférence max-prod	22
III.3.3.3- Méthode d'inférence somme-prod	22
III.3.4 - Interface de défuzzification	22
III.4- Différents types de régulateurs flous.....	24
III.4.1- Régulateur de type Mamdani	24
III.4.2- Régulateur de type Sugeno	25
III.5. Principe du régulateur flou.....	25
III.5.1. Variables d'entrées du régulateur.....	25
III.6. Avantages et inconvénients de la commande par logique floue.....	26

Chapitre VI
Application

VI.1 Introduction :28

VI.2. Modélisation du processus :29

 VI.2.1. Expression de la force d'attraction F en fonction du courant dans la
 bobine I et de l'entrefer e :29

 VI.2.2. Linéarisation du processus autour d'un point de repos $e(t) = e_0$ 29

VI.3 Asservissement de l'amplificateur de courant :32

VI.4. Modèles analogique et discret de l'asservissement de la position $x(t)$:35

VI.5. mise en oeuvre d'un regulateur flou :37

 VI.5.1. Fuzzification des variables :37

 VI.5.2. Définition des règles d'inférence :39

 VI.5.3. Défuzzification de la sortie :40

VI.6. Conclusion :48

conclusion générale..... 49

ANNEXE

BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction générale

Introduction générale :

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 et leurs paramètres sont souvent mal connus et/ou variables dans le temps. Pour la commande de telles classes de systèmes les méthodes conventionnelles de l'automatique ont montré leurs limites en termes de stabilisation et performances. Avec le développement 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.

Parmi ces dernières ; la commande par logique floue. Cette commande est à l'heure actuelle une des préoccupations des chercheurs dans le monde, Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'application de cette technique commande par logique floue aux systèmes physiques.

Durant ces dernières décennies, l'utilisation de la théorie des ensembles flous dans la modélisation et la commande des systèmes complexes a connue une évolution considérable.

En effet, le principe de la commande floue a été expérimenté pour la première fois en 1974 par l'équipe du professeur E.H. Mamdani Les résultats obtenus, ont été repris et développés par plusieurs équipes en Europe de l'Ouest Puis ensuite par l'Institut de Technologie de Tokyo et dans quelques autres universités japonaises Depuis 1987, date à laquelle la première application " grand public" a vue le jour. Utilisant la logique floue, le métro de Sendai, a été mis sur le marché

Depuis cette époque, l'utilisation des techniques de commande floue n'a cessé d'évoluer. Aujourd'hui, les différents travaux et publications récentes dans ce domaine semblent indiquer que les deux domaines d'application de la logique floue les plus importants sont :

- La conception de régulateurs pour des processus difficilement modélisables,
- La conception de régulateurs linéaires pour des processus modélisables.

La commande floue se différencie d'une commande classique par le fait que l'approche par logique floue synthétise une loi de commande à partir de l'expertise de l'opérateur humain. Dans le premier cas, la commande est synthétisée en évitant la phase modélisation. Par contre dans le second cas, la structure non linéaire du régulateur flou permet d'améliorer les performances en termes de précision et de robustesse du système non linéaire vis-à-vis des incertitudes structurées et non structurées.

Les avancées récentes en informatique et en électronique de puissance permettent la fabrication des systèmes prototypes, qui jouent le rôle de simulateurs réels miniatures. Ces derniers permettent de tester de nouvelles techniques de commande.

L'objectif de ce travail c'est une application d'une sustentation électromagnétique, consiste à utiliser un contrôleur flou pour maintenir la position de la partie mobile à une distance choisie.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude de la logique floue, une logique qui permet de faire le lien entre modélisation numérique et modélisation symbolique, ce qui a permis des développements industriels spectaculaire à partir d'algorithmes très simple de traduction de connaissances symboliques en entité numérique et inversement. On trouve dans cette partie les concepts de base de la théorie des ensembles flous, notion de variables linguistiques ainsi que les opérateurs logique et les règles floues.

La deuxième partie est consacrée au régulateur conventionnel PID, la synthèse de ce dernier dans le but œuvre un contrôleur PI pour la régulation du courant de l'amplificateur.

La troisième chapitre est consacré à l'étude de principe de la commande floue est ensuite abordé en présentant les différents types de régulateurs flous et en explicitant les éléments constitutifs de chaque type.

Dans la quatrième chapitre, nous introduisons la commande floue de cette système

Cette commande est basée sur les approches de EH Mamdani.

Et enfin nous terminons ce projet par une conclusion générale.

I.3. Les différents domaines d'applications:

Si les premières applications de la commande floue ont été développées en Europe par Mamdani, Van Lauta Lemke, Willayes...

Dans les années 1975, ce type de commande a été largement utilisé au Japon à la fin des années 80 et au début des années 90, sur le métro Sendai (Juillet 1987), dans la conception du lave-linge Aïsaïgo Day Fuzzy de Matsushita (Février 1990), par exemple.

Tirant profil d'une évolution de la technologie permettant d'aborder des problèmes en temps réel, à dynamique rapide (plus rapide que dans les premières applications de type conduite de processus lents: chaudière, fours,.....), l'industrie japonaise a développée des produits grand public à base de logique floue:

- appareils électroménagers (lave-linge, aspirateurs, autocuiseurs,...etc) ,
- systèmes audio-visuels (appareils de photos autofocus, caméscope à stabilisateur d'images, photocopieurs,...)
- systèmes automobiles embarqués (BVA, ABS, suspension, climatisation,...etc.),
- Systèmes autonomes mobiles,
- systèmes de transport (train, métro, ascenseur,...),
- Systèmes de conditionnement d'ambiance,
- systèmes de décision, diagnostic, reconnaissance,
- systèmes de contrôle/commande dans la plupart des domaines industriels de production, transformation, traitement de produit et déchet.

Terminons cette liste par une application, à savoir la commande à distance d'un hélicoptère sans pilote, pour des opérations de sauvetage ou inspection de sites dangereux, travail développé par l'équipe du Professeur Sugeno.

Ce système intrinsèquement non linéaire, instable et présentant de fort couplage, est caractérisé par 15 variables d'état et 4 commandes (vitesse et inclinaison des rotors), reçoit des ordres globaux du style: atterrissage, décollage, vol stabilisé, vol avant, vol arrière, virage à droite, virage à gauche,....

Un système à base de logique floue, très structuré hiérarchiquement (2 niveaux de commande, une douzaine de blocs d'une soixantaine de règles chacun), traite ces ordres pour arriver aux actions sur les organes de commande de l'hélicoptère, qui vole déjà dans le ciel de Tokyo.

I.4. Les concepts :

Le concept de la théorie des sous-ensembles flous, s'appuie sur la notion de degré d'appartenance d'un élément à un sous-ensemble flou. Tandis que les ensembles traditionnels sont caractérisés par une fonction d'appartenance notée χ , (également appelée fonction caractéristique) définie sur $\{0,1\}$, les sous-ensembles flous sont, eux, caractérisés par une fonction d'appartenance notée définie sur $[0,1]$.

En d'autres termes, dans le langage ensembliste classique, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble tandis qu'un élément appartient à un sous-ensemble flou avec un certain degré (éventuellement nul). En résumé, pour un sous-ensemble A défini sur un univers de discours U , on peut écrire :

A Sous-ensemble classique : fonction caractéristique $\chi_A: U \rightarrow \{0,1\}$

A Sous-ensemble flou : fonction d'appartenance $\mu_A: U \rightarrow [0,1]$

Par extension, ce nouveau concept définit une logique multi évaluée qui apparaît comme une généralisation de la logique binaire. Nous allons maintenant définir un certain nombre de termes propres au domaine de la logique floue auxquels nous pourrions nous référer.

I.4.1. Sous-ensemble flou :

Nous venons de voir ce que l'on entend par sous-ensemble ou, d'un point de vue formel. Un sous-ensemble A sur un univers de discours U , est représenté comme dans la *figure I.1* à travers sa fonction caractéristique μ_A . Il peut également être décrit par un certain nombre de caractéristiques comme:

Chapitre I

Chapitre I

Logique floue

I.1-Introduction	3
I.2- théorie de la logique floue	4
I.3-Les différents domaines d'applications.....	5
I.4- Les concepts.....	6
I.4.1-Sous-ensemble flou.....	6
I.4.2-Variable linguistique.....	8
I.4.3-Opérateurs de la logique floue.....	9
I.4.3.1-L'opérateur NON (complément).....	9
I.4.3.2 -L'opérateur ET (intersection).....	10.
I.4.3.3- L'opérateur OU (union)	10
I.4.4-Fonction d'appartenance	11
I.5-Conclusion.....	12

I.1. Introduction la logique floue :

Depuis quelques années déjà, on trouve sur le marché des appareils de grande consommation (appareils de photos, vidéo,...) qui sont présentés comme faisant intervenir un réglage par logique floue ou (fuzzy-logic) ou encre (fuzzy-control). Au delà de l'argument publicitaire évident, il est intéressant de comprendre ce nouveau concept de réglage étude l'appliquer à certains types de problèmes de réglage rencontrés par l'ingénieur.

Le principe du réglage par logique floue part du constat suivant :

Dans les problèmes de régulation auxquels il est confronté, l'homme ne suit pas, à l'image de ses inventions, un modèle mathématique fait de valeurs numériques et d'équations. Au contraire il utilise des termes tels que ((un peu trop chaud, aller beaucoup plus vite, freiner à fond, etc....)) ainsi que ses propres connaissances qu'il a dans le domaine. Ces connaissances sont, le plus souvent, acquises de façon empirique. Le principe du réglage par la logique floue s'approche de la démarche humaine dans le sens que les variables traitées ne sont pas des variables logiques (au sens de la logique binaire par exemple) mais des variables linguistiques, proches du langage humain de tous les jours. De plus, ces variables linguistiques sont traitées à l'aide de règles qui font référence à une certaine connaissance du comportement du système à régler. Sur la base de ce principe, différentes réalisations ont vu le jour et, actuellement, on trouve deux types de réglage par logique floue. Dans l'une de ces approches les règles sont appliquées aux variables à l'aide d'une approche numérique par le biais d'un microprocesseur spécial ou on d'un ordinateur. Dans l'autre approche, les règles sont appliquées aux variables de façon analogique. Ces deux approches permettent de développer des organes de contrôle par la logique floue que l'on désigne par processeur digital flou ou par processeur analogique flou.

La logique floue sert donc à représenter des connaissances incertaines et imprécises. La commande floue sert à prendre une décision même si l'on ne peut pas estimer les E/S ((entrées/sorties)) qu'à partir de prédicats vagues ou lorsque ses entrées/sorties sont entachées d'erreurs que l'on peut évaluer que grossièrement.

On conçoit l'intérêt de faire entrer l'approche floue dans la régulation ou l'asservissement des processus industriels, pour lesquels les informations disponibles sont souvent imprécises, incertaines et parfois qualitatives, dans des boucles de régulation parfois incomplètes. Le savoir faire de l'opérateur, constitué entre autres souvent des règles simples, lui permet de conduire chaque machine plus correctement parfois qu'un algorithme classique.

Les prémisses de la logique floue sont apparues avant es années 1940 avec les premières approches, par des chercheurs américains, du concept d'incertitude. Il a fallu attendre 1965, pour que le concept de sous ensemble floue soit proposé par L.A.Zadeh, automaticien de réputation internationale, professeur à l'université de Berkeley en Californie, qui a contribué à la modélisation de phénomène sous forme floue, en vue de pallier les limitations dues aux incertitudes des classiques à équation différentielle. En 1974, M. Mamdani expérimentait la théorie énoncée par Zadeh sur une chaudière à vapeur, matériel dont on connaît la complexité, introduisant ainsi la commande floue dans la régulation d'un processus industriel. Plusieurs applications ont alors vu le jour en Europe, pour des systèmes parfois très complexes, telle la régulation de fours de cimenterie réalisée par la société F.L. Smidt-Fuller Grace au chercheur japonais M. Sugeno, la logique floue était introduite au Japon dès 1985. Les sociétés japonaises comprirent l'avantage à la fois technique et commercial de la logique floue :

- Facilité d'implantation.
- Solution de problmes multivariables complexes.
- Robustesse vis-à-vis des incertitudes.
- Possibilité d'intégration du savoir de l'expert.

I.2. la théorie de la logique floue :

La logique floue vise à modéliser les model imprécis du raisonnement qui jouent un rôle très important dans la capacité humaine de prendre des décisions rationnelles dans un environnement incertain et imprécis.

L'avantage d'un tel système flou est que seules les connaissances du comportement de procédé à commander sont suffisante pour la synthèse de la loi de commande, et ils soulèvent un large intérêt , tant théorique que pratique , dans la commande du processus complexes et N-L .Cela est dû essentiellement a trois traits principaux :

- 1- Le premier est que les systèmes flous permettent une simple inclusion d'informations qualitatives dans la conception du contrôleur.
- 2- Le second est que les systèmes flous n'exigent pas l'existence d'un modèle analytique du processus à contrôler, et peu d'information est suffisant pour mettre en oeuvre la boucle de commande.
- 3- Le troisième est que les systèmes flous sont des systèmes non linéaire et de ce fait plus adaptés à la commande des processus non linéaire.

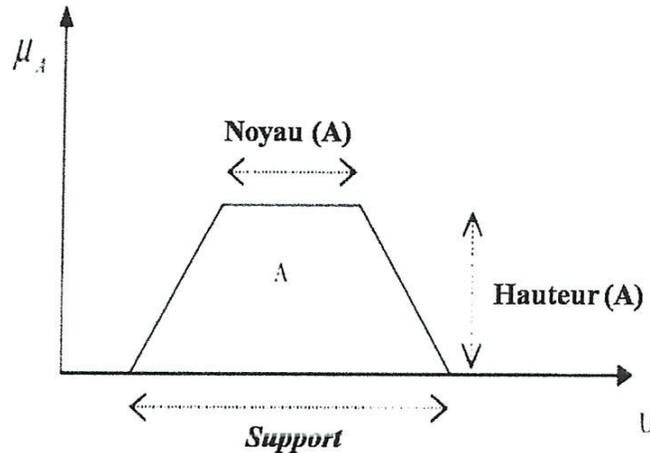


Figure I.1 : Représentation d'un sous-ensemble flou et principales Caractéristiques

➤ **son support :**

$$\text{Support}(A) = \{x \in U / \mu_A(x) \neq 0\}$$

➤ **sa hauteur :**

$$\text{Hauteur}(A) = \sup\{\mu_A(x) / x \in U\}$$

➤ **son noyau :**

$$\text{Noyau}(A) = \{x \in U / \mu_A(x) = 1\}$$

Le concept de sous-ensemble flou a été introduit pour éviter les passages brusques d'une classe à une autre (de la classe noire à la classe blanche par exemple) et autoriser des éléments à n'appartenir complètement ni à l'une ni à l'autre (à être gris, par exemple) ou encore à appartenir partiellement à chacune (avec un fort degré à la classe noire et un faible degré à la classe blanche dans le cas du gris foncé).

Remarque : Le terme « sous-ensemble » flou provient du fait que celui-ci est considéré comme une partie de l'univers de discours U. Dans la littérature, on peut trouver parfois ensemble flou, qui constitue un abus de langage.

I.4.2. Variable linguistique :

Une variable linguistique est un triplet (V, X, T_V) dans lequel V une variable définie sur un ensemble de référence X . L'ensemble $T_V = \{A_1, A_2, \dots\}$, fini ou infini, contient des sous ensembles flous normalisés de X , utilisables pour caractériser V . (un sous ensemble flou normalisé de X , est un sous ensemble flou dont la valeur maximale que peut prendre sa fonction d'appartenance est égale à 1).

Les sous-ensembles flous de T_V définissent des restrictions des valeurs que prend V dans X . Pour simplifier, on note A_i à la fois le terme linguistique (« faible », « cher »...) et le sous-ensemble flou qui lui est associé.

Prenons l'exemple suivant :

Considérons l'énergie d'un signal comme variable V , définie sur l'ensemble X des réels positifs

$T_V = \{\text{très petite, Petite, Moyenne, Grande, très grande}\}$;

Donc notre variable linguistique sera définie par :

- $V = \text{Énergie.}$
- $X = \mathcal{R}^+$
- $T_V = \{\text{très petite, Petite, Moyenne, Grande, très grande}\}.$

On pourra choisir la fonction d'appartenance sous forme trapézoïdale. Cette situation est représentée sur la figure V.3*

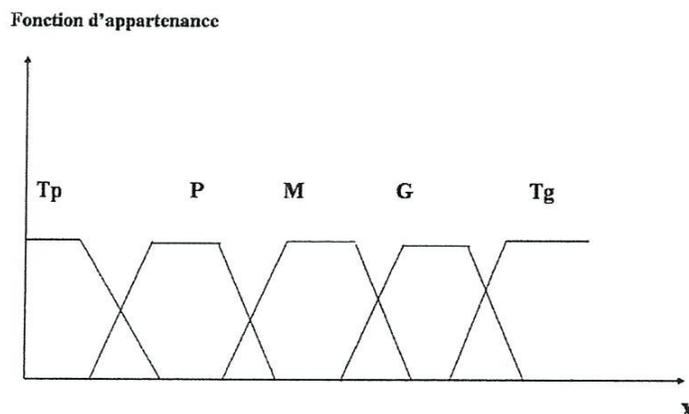


Fig.I.2. Exemple d'une variable linguistique utilisée pour décrire l'énergie d'un signal

Selon le type et le besoin de l'utilisation, le nombre des éléments de T_V est plus ou moins grand, ce qui veut dire que la description de V est plus ou moins fine.

I.4.3. Opérateurs de la logique floue :

Les variables linguistiques sont liées entre elles au niveau des inférences par des opérateurs ET ou OU. Il s'agit d'opérateurs de la logique floue qui interviennent sur les fonctions d'appartenance représentant les variables linguistiques.

Le plus souvent, les opérateurs ET ou OU sont réalisés respectivement par les règles «min» et «max». Il y a alors une certaine affinité avec les règles de la logique classique. Cependant, il existe un grand nombre de règles pour la réalisation des opérateurs ET et OU qui tiennent compte du caractère particulier de la logique floue.

Soit A et B deux ensembles flous définis dans le référentiel U avec les fonctions d'appartenance μ_A et μ_B respectivement

I.4.3.1. L'opérateur NON (complément) :

Il est défini mathématiquement par :

- $B = \{x / x \notin A\}$
- $\mu_B(x)$ est représenté par la fonction : $non(\mu_A(x)) = \mu_B(x) = 1 - \mu_A(x)$

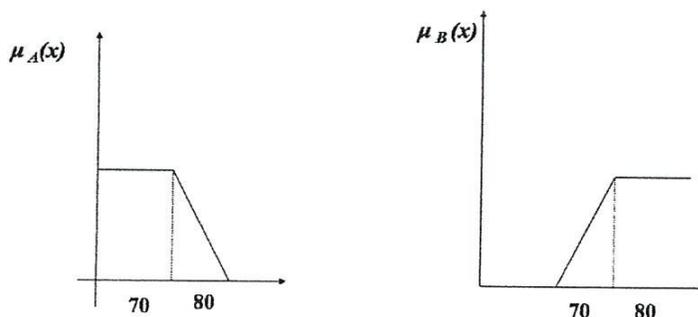


Figure. I.2 : opérateur NON

I.4.3.2. L'opérateur ET (intersection) :

Il est défini mathématiquement par :

$$A \cap B = \{x/x \in A \wedge x \in B\}$$

Et est représenté par la fonction

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \min [\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

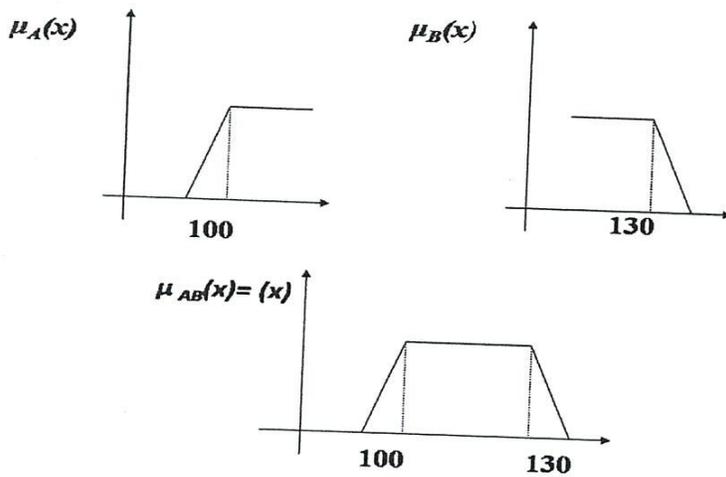


Figure. I.3 : opérateur ET

III 4.3.3 L'opérateur OU (union) :

Il est défini mathématiquement par :

$$A \cup B = \{x / x \in A \vee x \in B\}$$

Et est représenté par la fonction

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \max [\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

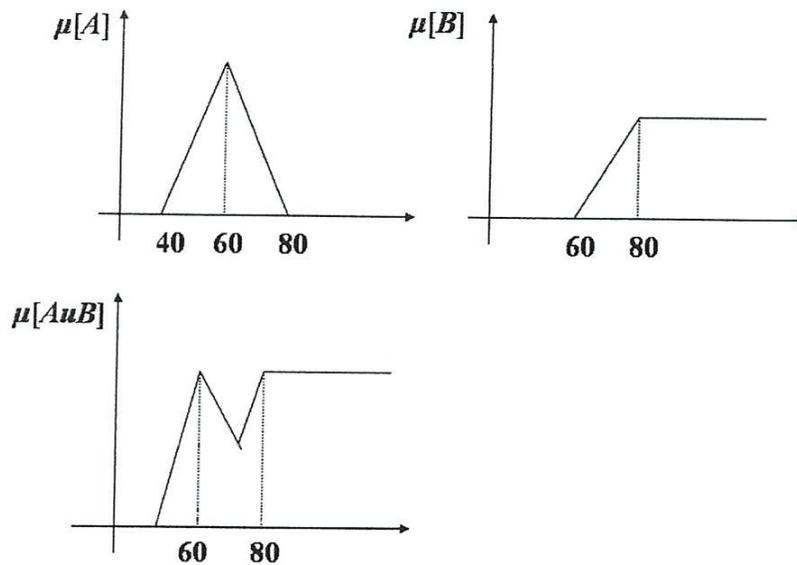


Fig.I.4 : opérateur ET

I.4.4. Fonction d'appartenance :

Afin de permettre un traitement numérique des variables linguistiques dans la prise de décisions floues sur ordinateur, une définition des variables linguistiques à l'aide de fonctions d'appartenance s'impose. Dans ce contexte on associe à chaque valeur de la variable linguistique une fonction d'appartenance désignée par $\mu_A(x)$, qui sera désignée par le degré ou le facteur d'appartenance. Il est à noter que l'ensemble des éléments de x pour lesquels $\mu_A(x) > 0$, est appelé «support de A». Le plus souvent, on utilise pour les fonctions d'appartenance les fonctions suivantes :

- **Fonction triangulaire** : Elle est définie par trois paramètres $\{a, b, c\}$ qui déterminent les coordonnées des trois sommets.

$$\mu(x) = \text{Max}\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right)$$

- **Fonction trapézoïdale** :
- **Fonction gaussienne** :
- **Fonction sigmoïdale** :

Alors :

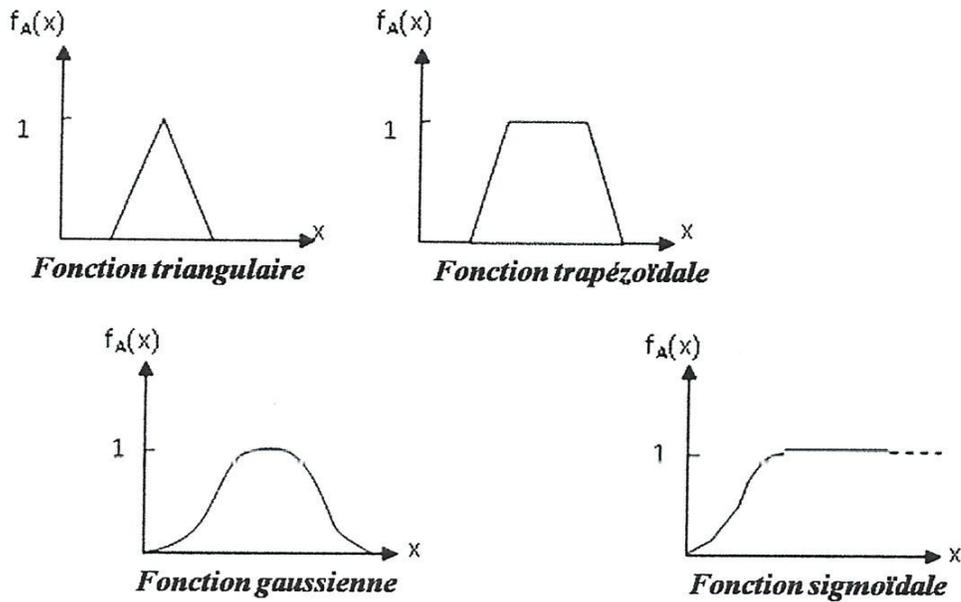


Fig.I.5. Quelques fonctions d'appartenances

I.5.Conclusion :

La logique floue va prendre de plus en plus de place dans le domaine du réglage .cette affirmation est motivée par le fait que ce principe nécessite pas de modèle du système à régler et qu'il utilise les connaissances de l'opérateur (expert).

Dans le développement, l'approche digitale est, évidemment, la plus souple à mettre en œuvre ; son cout, son encombrement et sa consommation peuvent devenir un handicap pour certaines applications en productions. Pour ces applications l'approche analogique apporte une solution intéressante.

Chapitre II

Chapitre II
Commande PID CLASSIQUE

II.1-Introduction.....	13
II.2-Principe général	13
II.2.1-Trois facteurs: P, I et D.....	13
II.2.1.1-Le facteur proportionnel: P.....	13
II.2.1.2-Le facteur intégral: I.....	13
II.2.1.3-Le facteur dérivé: D.....	14
II.3-Réglage d'un PID.....	15
II.4-Conclusion.....	17

II.1.Introduction :

Un régulateur proportionnel intégral dérivé (PI D) est un organe de contrôle permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée d'un système industriel.

C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie et permet de contrôler la grande majorité des procédés.

II.2.Principe général :

Le PID permet 3 facteurs simultanés sur l'erreur consigne/mesure :

II.2.1.Trois facteurs: P, I et D

Mais alors, comment vas-t-on asservir (comprendre réguler) cette intensité? Tout simplement, nous allons calculer l'écart entre la valeur actuelle et la valeur désirée de l'intensité (ce que l'on appellera l' **erreur**), et lui faire subir une multiplication (d'un facteur P), une intégration (d'un facteur I) et une dérivation (vous l'aurez compris, d'un facteur D); et du résultat obtenu la tension de sortie dépendra directement.

II.2.1.1Le facteur proportionnel: P

Les plus basics des contrôleurs boucle fermée ne fonctionne qu'avec le terme P: plus l'erreur sera grande, plus on modifiera la tension pour que cette erreur diminue. Prenez le cas d'un poids attaché à un ressort par exemple: quant vous lâchez le poids, il tombe (logique), et tend de plus en plus le ressort.

Mais le ressort tirera d'autant plus la masse vers le haut que celle-ci s'écarte de sa position d'équilibre (l'erreur augmente); la masse va donc être de plus en plus freinée au fur et à mesure qu'elle descend, jusqu'au moment où elle va s'arrêter. Arrêt sur image: l'effet P (le ressort) a donc augmenté la précision du système (la masse s'est arrêtée au lieu de tomber jusqu'à vos pieds). Start: La masse ne s'arrête pas là, bien au contraire! Elle file droit vers le haut, s'arrête, et recommence à tomber. S'ensuit alors une oscillation du système: le masse ne s'arrêtera pas à la position d'équilibre avant longtemps, que quant les pertes (frottements) auront absorbé toute l'énergie du système.

Deuxièmes problème, la position d'équilibre du système correspond à une position où le ressort est tendu: l'erreur n'est pas nulle à la fin! En pratique, on appelle ça l'**erreur statique**, et c'est ici qu'intervient le facteur I:

II.2.1.2.Le facteur intégral: I

Il devient maintenant plus tôt difficile (et assez abstrait) de schématiser le système par une masse reliée par un ressort, mais nous allons considérer que la ressort est tel que sa tension (la force qu'il développe) est proportionnelle (P) à son élongation (erreur), mais aussi qu'il augmente avec le temps. En général il sera assez faible que pour n'agir que sur l'erreur statique: la tension du

ressort va augmenter petit à petit et jusqu'à ce que la masse soit à la position où l'élongation du ressort (erreur) est nulle. Nous nous sommes donc débarrassés de cette erreur statique.

II.2.1.3. Le facteur derive: D

Rajoutons encore une propriété à notre ressort: Il va s'opposer aux variations brusques de sa longueur. Ici par contre il existe un exemple concret, que vous connaissez tous: les amortisseurs de voiture! Et, dans un système PID comme sur les voitures, les amortisseurs sont là garder la voiture à une certaine hauteur de la route (et donc rattrapent l'erreur) et à éviter que la voiture oscille (ces oscillations sont absorbées par l'huile des amortisseurs). Ici le coefficient D servira à atténuer les oscillations du système: ça a un double effet positif: ça a tendance à améliorer le temps qu'il faut au système à se stabiliser, et à réduire (ou éliminer) le dépassement (quant notre masse remonte trop haut, au dessus du ressort)

Une action **Proportionnelle** : l'erreur est multipliée par un gain G

Une action **Intégrale** : l'erreur est intégrée sur un intervalle de temps s , puis divisée par un gain T_i

Une action **Dérivée** : l'erreur est dérivée suivant un temps s , puis multipliée par un gain T_d

Il existe plusieurs architectures possibles pour combiner les 3 effets (série, parallèle ou mixte), on présente ici une architecture parallèle :

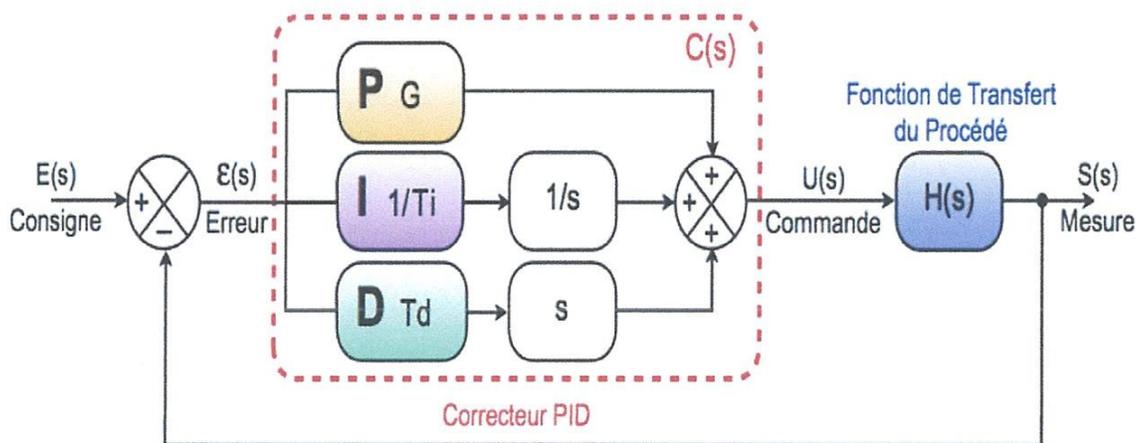


Figure. II.1 : architecture du régulateur PID

La fonction de transfert avec la transformée de Laplace du régulateur PID parallèle est la somme des 3 actions:

$$C(s) = G + \frac{1}{T_i} \cdot \frac{1}{s} + T_d \cdot s = \frac{G \cdot T_i \cdot s + 1 + T_d \cdot T_i \cdot s^2}{T_i \cdot s}; \quad s = \frac{du}{dt}$$

Les différents paramètres à trouver sont G , Td et Ti pour réguler le procédé ayant pour fonction de transfert $H(s)$. Il existe de nombreuses méthodes pour trouver ces paramètres. Cette recherche de paramètre est communément appelée réglage.

La fonction de transfert du contrôleur PID idéale est irréalisable car l'ordre du numérateur est supérieur à l'ordre du dénominateur. Dans la réalité, on rajoute toujours un paramètre alpha sur l'action dérivée de manière à obtenir un ordre 2 au numérateur et au dénominateur :

$$Td \cdot s \rightarrow \frac{Td \cdot s}{1 + \alpha \cdot Td \cdot s}$$

Avec $\alpha \ll 1$

On obtient alors une nouvelle fonction de transfert réalisable pour notre régulateur:

$$C(s) = \frac{(G \cdot Ti \cdot Td \cdot \alpha + Td \cdot Ti)s^2 + (G \cdot Ti + \alpha \cdot Td) \cdot s + 1}{\alpha \cdot Ti \cdot Td \cdot s^2 + Ti \cdot s}$$

Néanmoins, pour limiter les effets néfastes du bruit du signal de mesure sur le signal de commande u , on modère l'effet de l'action dérivée dans les régulateurs industriels en adoptant généralement alpha : $\alpha \approx 0,1$.

II.3. Réglage d'un PID :

Le réglage d'un PID consiste à déterminer les coefficients G , Td et Ti afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation. L'objectif est d'être robuste, rapide et précis. Il faut pour cela limiter le ou les éventuels dépassements (*overshoot*).

La robustesse est sans doute le paramètre le plus important et délicat. On dit qu'un système est robuste si la régulation fonctionne toujours même si le modèle change un peu. Par exemple, les fonctions de transfert de certains procédés peuvent varier en fonction de la température ambiante ou de l'hygrométrie ambiante relativement à la loi de Pascal. Un régulateur doit être capable d'assurer sa tâche même avec ces changements pour éviter de redévelopper un nouveau régulateur toutes les semaines.

La rapidité du régulateur dépend du temps de montée et du temps d'établissement du régime stationnaire.

Le critère de précision est basé sur l'erreur statique .

La réponse type d'un procédé stable est la suivante :

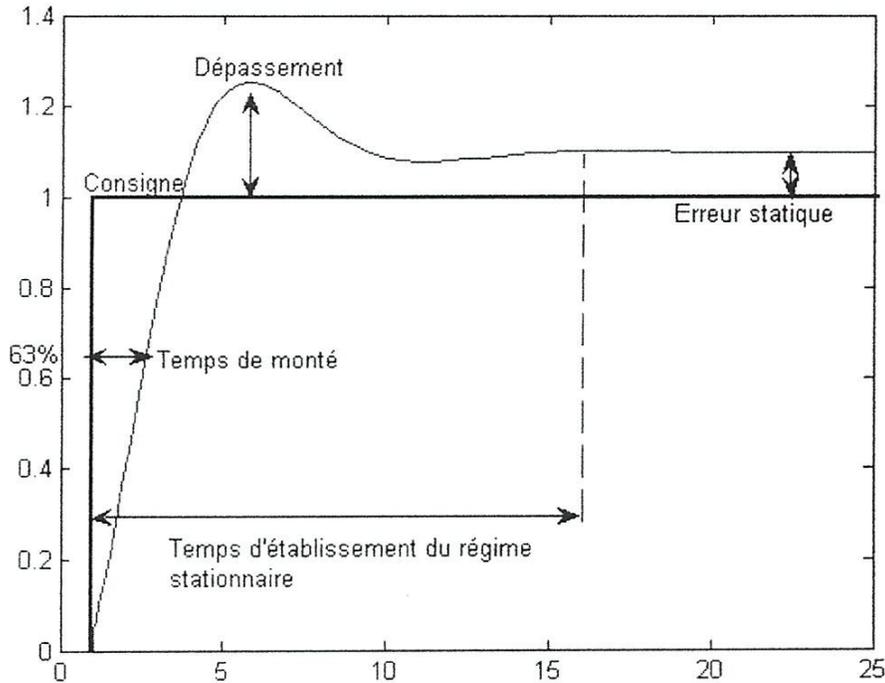


Figure III.1.b : réglage d'un PID

Les paramètres du PID influencent la réponse du système de la manière suivante :

G : Lorsque G augmente, le temps de montée (*rise time*) est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement varie peu et l'erreur statique se trouve améliorée.

Ti : Lorsque $1/T_i$ augmente, le temps de montée est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement au régime stationnaire s'allonge mais dans ce cas on assure une erreur statique nulle.

Td : Lorsque T_d augmente, le temps de montée change peu mais le dépassement diminue. Le temps d'établissement au régime stationnaire est meilleur. Pas d'influences sur l'erreur statique.

L'analyse du système avec un PID est très simple mais sa conception peut être délicate, voire difficile, car il n'existe pas de méthode unique pour résoudre ce problème. Il faut trouver des compromis, le régulateur idéal n'existe pas. En général on se fixe un cahier des charges à respecter sur la robustesse, le dépassement et le temps d'établissement du régime stationnaire.

Les méthodes de réglage les plus utilisées en théorie sont la méthode de Ziegler-Nichols, la méthode de P. Naslin (polynômes normaux à amortissement réglable), la méthode du lieu de Nyquist inverse (utilise le diagramme de Nyquist).

Dans environ 15% des cas les performances d'un PID peuvent devenir insuffisantes en raison de la présence d'un retard trop important dans le modèle du procédé, on fait alors appel à d'autres algorithmes de réglage (notamment : régulateur PIR ou à modèle interne ou à retour d'état).

II.4.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés au régulateur au standard PID.

Ce dernier demande toujours un modèle le plus précis possible du système à contrôler.

Le modèle analytique doit être le plus précis possible afin de représenter au mieux la réalité physique

Chapitre III

Chapitre III Commande floue

III.1-Introduction	18
III.2- Propriétés d'une commande par logique floue	19
III.3- Structure d'un régulateur flou.....	19
III .3.1- Interface de fuzzification.....	20
III.3.2- Base de connaissances.....	21
III.3.3- Moteur d'inférence floue.....	22
III.3.3.1- Méthode d'inférence max-min	22
III.3.3.2- Méthode d'inférence max-prod	22
III.3.3.3- Méthode d'inférence somme-prod	22
III.3.4 - Interface de défuzzification	22
III.4- Différents types de régulateurs flous.....	24
III.4.1- Régulateur de type Mamdani	24
III.4.2- Régulateur de type Sugeno	25
III.5. Principe du régulateur flou.....	25
III.5.1. Variables d'entrées du régulateur.....	25
III.6. Avantages et inconvénients de la commande par logique floue.....	26
III.7-Conclusion.....	27

III.1. Introduction :

Devant le problème délicat du contrôle et de la commande des systèmes complexes non linéaires et multi variables, les outils utilisés deviennent de plus en plus pointus. Un engouement certain s'est porté depuis quelques années autour de la logique floue, en parallèle des avancées de l'automatique classiques.

La théorie de la logique floue traite deux problèmes

- théorie de l'ensemble flou
- théorie de mesure floue

La motivation primaire de la logique floue est la possibilité d'exploiter la tolérance de l'imprécision et de l'inexactitude.

L'idée d'appliquer les techniques floues au domaine du contrôle des processus a été proposée la première fois par Change et Zadeh en 1972. Leur démarche reposait sur une approche à base de modèle en utilisant le concept de fonction flou. Les principes de la logique floue ont été appliqués en 1974 par E.H Mamdani à la construction d'un premier contrôleur flou pour une commande de vitesse d'un moteur [Mamdani, 74].

Mais ce n'est que depuis quelques années que la commande floue a connu, essentiellement au Japon, un essor remarquable ; Elle a été appliquée à des problèmes aussi divers que la purification de l'eau, la fabrication du ciment, la marche automatisée d'une rame de métro, etc.

L'attitude des automaticiens à l'égard de la commande floue a d'abord été réservée : après avoir, pendant des décennies, affirmé la nécessité d'identifier le mieux possible un système pour pouvoir construire une commande ayant des performances satisfaisantes, fallait-il faire confiance à cette méthode, qui prétendait remplacer les commandes plus ou moins sophistiquées, basées sur l'identification, par des techniques s'appuyant sur le savoir-faire humain plutôt que sur des équations ?

Actuellement, cette attitude a évolué. On peut penser que la commande floue va peu à peu prendre place dans la panoplie de l'ingénieur contemporain, sans supplanter les méthodes traditionnelles, et qu'elle constituera un complément précieux dans le cas des systèmes difficilement identifiables ou dont les paramètres subissent des variations brutales.

Ils existent beaucoup d'efforts de recherches réussies pour les applications de la théorie de la logique floue aux systèmes à commander. Ces travaux montrent une performance remarquable de ce type de régulateur en comparant avec le régulateur PID conventionnel

Ce chapitre est consacré à la structure et le fonctionnement d'un régulateur flou, qui est sera utilisé dans le cadre de cette thèse. Deux méthodes de commande sont présentées : la méthode de Mamdani et la méthode de Sugeno, nous donnons ensuite les méthodes d'un tel régulateur et les résultats de simulations.

III.2. Propriétés d'une commande par logique floue :

Les propriétés essentielles d'une commande par logique floue peuvent être résumées de la manière suivante :

- Mesure de plusieurs grandeurs : la grandeur à régler et d'autres grandeurs caractérisant le comportement dynamique du système à régler,
- Comportement non linéaire du système,
- Aptitude à commander convenablement surtout des systèmes avec un comportement dynamique compliqué, dont la modélisation est difficile,
- Connaissance approximative des paramètres du système à commander

La détermination de la stratégie de commande représente l'étape la plus importante, lors de conception d'une commande par logique floue.

En effet, cette dernière contient la détermination de plusieurs paramètres.

L'ensemble de ces derniers est très important ; nombre et forme des variables linguistiques des entrées, et mêmes des sorties, choix des différentes logiques, choix de la méthode de défuzzification...

L'analyse de l'influence de ces paramètres n'est évidemment pas une chose facile.

Néanmoins, plusieurs études récentes ont tenté en partie de faire varier certains de ces paramètres pour dégager quelques règles.

Des études concernant les fonctions d'appartenance ont été menées néanmoins la forme et le nombre néanmoins la forme et le nombre de ces dernières sont très dépendants de l'application et ne peuvent se dissocier de la partie règles floues. Même chose pour les règles floues, une très grande quantité de travaux ont été réalisés dans le but est d'améliorer et innover cette partie très importante dans un régulateur flou.

Parmi ces travaux on peut citer les plus récents tels que et Des études ont été également menées concernant les gains de normalisation

III.3. Structure d'un régulateur flou :

Le régulateur par logique flou est composé de quatre éléments de base suivants

- Interface de fuzzification,
- Base de connaissances,
- Moteur d'inférence floue,
- Interface de défuzzification.

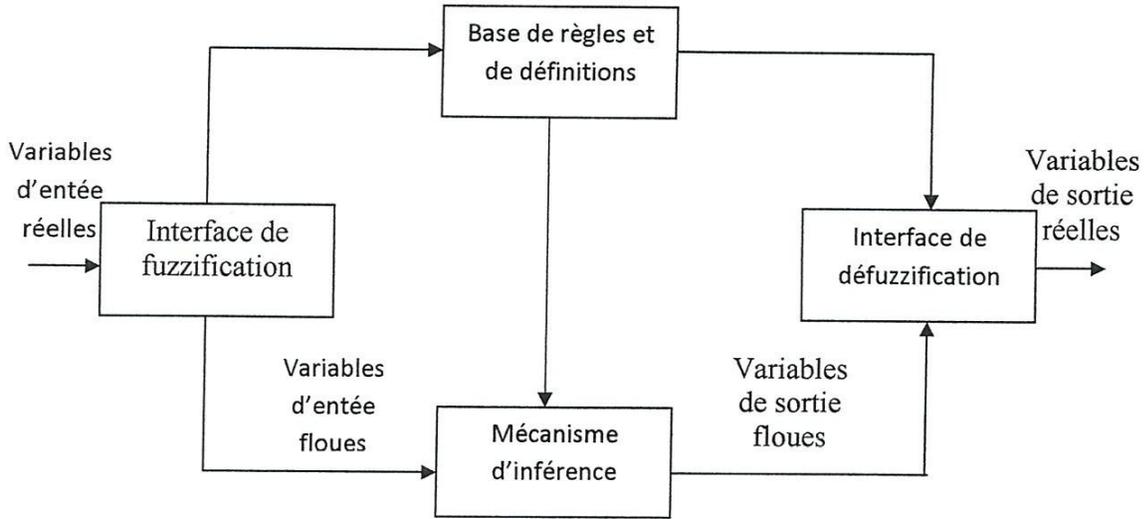


Figure .III.1 : Structure de base d'un régulateur flou

III.3.1. Interface de fuzzification :

Transforme les entrées numériques (vecteurs précises) en des ensembles flous. Le choix de l'opérateur de fuzzification dépend de la confiance que l'on accorde aux mesures effectuées. Ainsi si la mesure X_0 est exacte, le sous-ensemble flou X_0 doit être représenté par un *fait précis*. Par conséquent, on utilise comme opérateur de fuzzification la transformation dite de singleton. La fonction d'appartenance du sous ensemble flou X_0 est alors définie par :

$$\mu : x \in U \setminus \{X_0\} \longrightarrow 0$$

$$X_0 \longrightarrow 1$$

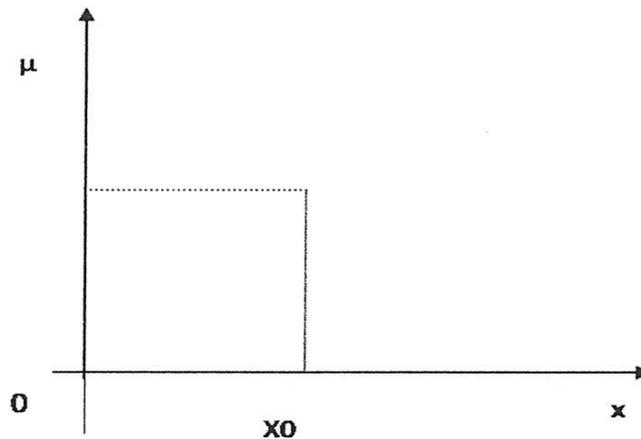


Figure.III.2 Méthode de fuzzification pour une mesure exacte

Par contre, si la mesure de la variable est incertaine, par exemple à cause du bruit le sous-ensemble flou A_x doit être représenté par un *fait imprécis*.

On utilise alors la méthode de fuzzification qui associée à la variable de mesure x_0 une fonction d'appartenance telle que, par exemple :

$$\mu(x) = \max \left\{ 0 ; 1 - \frac{|x - x_0|}{\varepsilon} \right\}$$

La représentation graphique de cette fonction est représentée par la figure III.3

Ce sous-ensemble flou comprend donc la mesure X_0 avec une appartenance unité et les valeurs voisines de x_0 avec une appartenance inversement proportionnelle à l'écart avec X_0 .

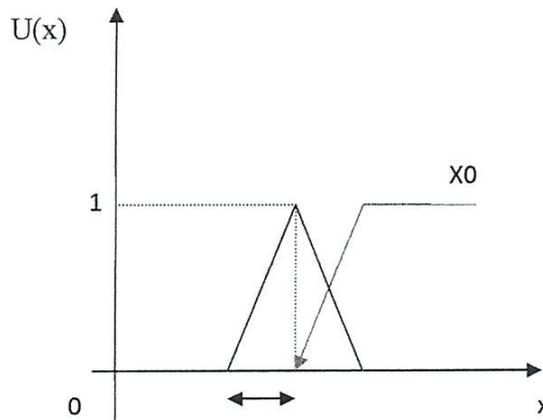


Figure III.3 : Méthode de fuzzification pour une mesure incertaine

La base du triangle est fonction de l'importance relative des erreurs de mesures.

En effet, plus elles sont importantes, plus la mesure de la variable x_0 devient imprécise, et donc, plus le triangle doit s'élargir.

III.3.2. Base de connaissances :

La conception d'une base de connaissances représente la phase dans la conception des systèmes experts.

Elle comprend la base de données et la base des règles floues

➤ La base de données :

Contient la définition des ensembles flous, les facteurs d'échelle pour la normalisation des ensembles de référence et la partition de l'espace flou d'entrée et sortie.

➤ La base des règles floues :

Elle rassemble l'ensemble des règles floues de type « Si-Alors » décrivant en termes linguistiques basés sur la connaissance d'un expert le comportement dynamique du système.

R_1 : Si X_i est A_1^1 Et X_n et A_n^1 Alors U_1 est B^1

Avec : $[x_1 \dots x_n]$: Les entrées du régulateur

U_1 : La sortie du régulateur.

Chaque régulateur activé donne un sous-ensemble flou de sortie

III.3.3. Moteur d'inférence floue :

C'est un mécanisme de décision. Il permet à partir d'un fait observé de la base des règles floues une décision en exploitant le raisonnement approximatif. Dans les inférences de régulateur par logique floue interviennent les opérateurs ET et OU. L'opérateur ET s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle tandis que l'opérateur OU lie les différentes règles.

Il existe plusieurs méthodes pour réaliser ces opérateurs dans une inférence et qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance à savoir :

- Méthode d'inférence max-min (Mamdani)
- Méthode d'inférence max-prod (Larsen)
- Méthode d'inférence somme-prod (Sugeno)

III.3.3.1. Méthode d'inférence max-min :

Méthode d'inférence max-min, réalise, au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation du maximum et l'opérateur ET par la formation du minimum.

III.3.3.2. Méthode d'inférence max-prod :

La méthode d'inférence max-prod réalise en général, au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation du maximum et l'opérateur ET par la formation du minimum, par contre, la conclusion dans chaque règle, introduite par ALORS, qui lie le facteur d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie XR par l'opérateur ET, est réalisée cette fois ci par la formation du produit (minimum pour la méthode d'inférence max-min).

III.3.3.3. Méthode d'inférence somme-prod :

Par opposition aux méthodes d'inférence précédentes, la Méthode d'inférence somme-prod réalise, au niveau de la condition, l'opération OU par la formation de la somme, plus précisément par la valeur moyenne, tandis que l'opération ET est réalisée par la formation du produit

III.3.4. Interface de défuzzification :

La stratégie de commande utilisée est décrite par un ensemble de déclaration linguistique ou règles. Puisque le processus exige à ses entrées des valeurs non floues, l'ensemble flou de sortie du régulateur doit être défuzzifié.

La défuzzification est l'opération qui consiste à extraire d'un ensemble flou une valeur numérique considérée comme valeur significative. Dans la commande en temps réel, un critère de choix de la commande de défuzzification est la simplicité de calcul.

- **Méthode du centre de gravité (DEF1) :**

C'est la méthode la plus utilisée dans les contrôleurs flous. Elle donne comme valeur le centre de gravité de l'ensemble flou. La sortie défuzzifiée Z est définie par :

$$Z = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_z(z_j) z_j}{\sum_{j=1}^n \mu_z(z_j)}$$

- **Méthode du plus grand maximum (DEF2) :**

Cette méthode donne comme résultat la plus grande valeur dont la grandeur a le plus grand degré d'appartenance.

- **Méthode du plus petit maximum (DEF3) :**

Elle donne comme résultat la plus petite valeur dont la grandeur a le plus grand degré d'appartenance.

- **Méthode de la moyenne des maxima (DEF4) :**

Elle donne comme valeur la moyenne des valeurs dont le degré d'appartenance est maximal.

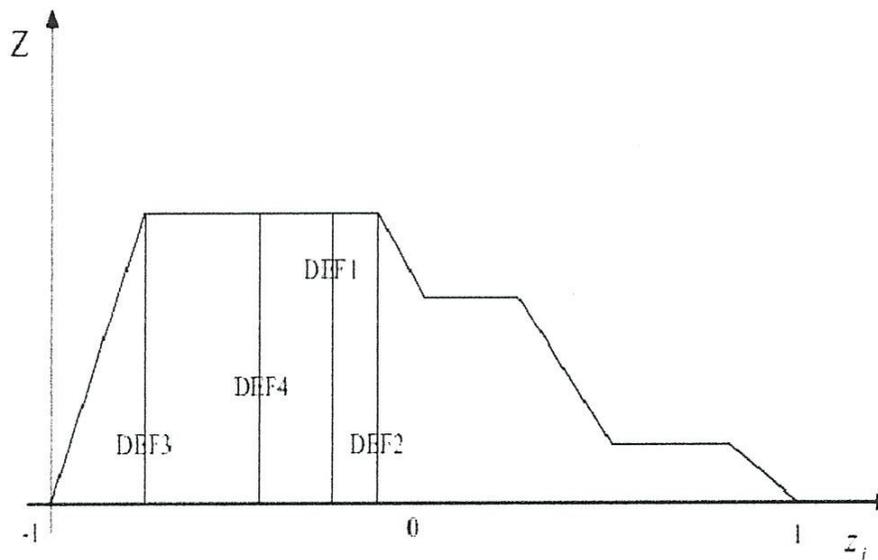


Figure.III.4: Différentes méthodes de défuzzification

III.4. différents types de régulateurs flous :

III. 4.1. Régulateur de type Mamdani :

Dans la plupart des applications reportées dans la littérature, un contrôleur de cetyp est conçu pour réguler, asservir une variable de sortie d'un procédé, soit uniquement à partir de l'erreur e (consigne moins mesure), soit à partir de l'erreur et de sa variation Δe .

En 1974, E.H Mamdani avait présenté, pour la première fois, la technique de réglage par logique floue.

Celle-ci consiste à déterminer un ensemble de règles qui maîtrise le comportement dynamique du système à commander.

L'obtention de ces règles est facile auprès des experts qui connaissent bien le système.

Il avait utilisé des règles à prémisses et conclusions symboliques, l'inférence (max, min), et la défuzzification par centre de gravité.

Après, Macvicar et Whelan ont observé que les bases de règles proposées par King et Mamdani étaient incomplètes. Ils ont fait une analyse détaillée sur ces bases de règles et proposé une matrice de règles (voir *tableau I.1*) qui possède deux entrées, l'erreur et sa variation, en se basant sur les deux principes suivants

- Si la sortie est égale à la valeur désirée et la variation de l'erreur est nulle, la commande sera maintenue constante.
- Si la sortie diverge de la valeur désirée, l'action sera dépendante du signe de la valeur de l'erreur et de sa variation.

Si les conditions sont telles que l'erreur peut être corrigée par elle-même, alors la commande sera maintenue. Dans le cas contraire, la commande sera changée pour avoir des résultats satisfaisants.

$e \backslash \Delta e$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZE
NS	NB	NB	NS	ZE	PS
ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
PS	NS	ZE	PS	PB	PB
PB	ZE	PS	PB	PB	PB

Tableau III.1 : Matrice de Macvicar-Whelan

e : L'écart entre la sortie du système et la consigne.

Δe : Variation de l'erreur.

NB : Negative grand "Négative Big".

NS: Negative petit "Negative Small".

ZE : Zero

PS : Positif petit "Positive Small"

PB : Positif grand "Positive Big"

III.4.2. Régulateur de type Sugeno :

Dans les régulateurs de ce type, les conclusions des règles ne sont pas symboliques (i.e représentées par des sous ensembles flous) mais une fonction (numériques) des entrées :

$b^i = f(x_i, k, x_n)$, les prémisses étant symboliques.

Où : $f(.)$ est généralement fonction polynomiale.

La sortie du régulateur est donnée par :

$$\Delta u = \frac{\sum_{j=1}^n b^j \alpha_j(x)}{\sum_{j=1}^n \alpha_j}$$

Où les α_i sont les valeurs de vérité de chaque règle pour $i = 1 \text{ à } n$.

Notons que la sortie donnée par le régulateur est la variation du signal de commande

III.5. principe du regulateur flou :

III.5.1. Variables d'entrées du régulateur :

Un régulateur flou permet de déterminer la commande à appliquer à un processus à partir de la valeur s de la variable de sortie de ce contrôleur ; celle-ci est elle-même déterminée à partir des valeurs des variables d'entrée e , $\Delta e \in \mathbb{K}$ du régulateur par des relations floues, ou règles floues.

Théoriquement, le nombre d'entrée n'est pas limité.

En pratique, cependant, il n'est pas rationnel d'utiliser plus de trois variables d'entrée puisque la détermination des règles devient trop complexe.

Pour le régulateur décrit par la *figure 1.13*, nous n'avons intervenir que deux variables d'entrée :

$e(k) = y_d(k) - y(k)$: Écart entre la consigne $y_d(k)$ et le signal de sortie du processus $y(k)$.

$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$:

Variation du signal d'écart à l'instant k .

K_e et K_{de} : gains de normalisation de l'erreur et de sa variation

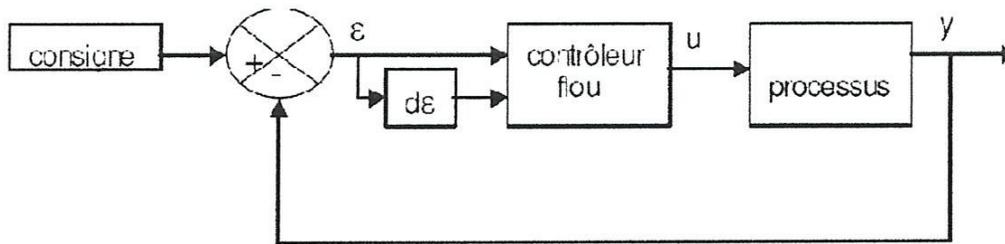


Figure. III.5: Schéma d'un système asservi par un régulateur flou

III.6. Avantages et inconvénients de la commande par logique floue :

Certainement, la commande par logique floue comporte un certain nombre d'avantages et d'inconvénients. Les avantages essentiels sont :

- La non-nécessité d'une modélisation du processus à commander, ainsi que d'une analyse mathématique profonde,
- La possibilité de bénéficier et d'implémenter des connaissances et des expertises humaines sur le système à commander,
- La maîtrise de systèmes à régler avec un comportement complexe (fortement non linéaire et difficile à modéliser), aussi, cette approche offre la possibilité d'utiliser des processeur spécialisé (dit processeurs flous), afin d'augmenter la précision ainsi la vitesse de calcul,

Par contre, les inconvénients sont :

- Le manque de méthodes systématiques précises pour la conception et la synthèse d'une commande par logique floue (par exemple dans le choix des grandeurs à mesurer, dans les déterminations des facteurs de normalisation, dans le choix de la stratégie, soit de la fuzzification, les inférences soit de la
- L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de commande en toute généralité,
- La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible),
- La possibilité d'apparition de cycles limites à cause du fonctionnement non linéaire

III.7. Conclusion

Une des applications de la logique floue est la conduite de processus. L'intérêt suscité par ce nouveau type de contrôle ne cesse de croître, et ce dans des domaines très variés. Les raisons en sont principalement une grande souplesse et une relative facilité de conception.

Le régulateur par logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences avec plusieurs règles se basant sur des variables linguistiques. Ces inférences sont alors traitées par des opérateurs de la logique floue.

Chapitre IV

Chapitre IV Application

IV.1 Introduction :.....	28
IV.2. Modélisation du processus :	29
IV.2.1. Expression de la force d'attraction F en fonction du courant dans la bobine I et de l'entrefer e :	29
IV.2.2. Linéarisation du processus autour d'un point de repos $e(t) = e_0$	29
IV.3 Asservissement de l'amplificateur de courant :.....	32
IV.4. Modèles analogique et discret de l'asservissement de la position $x(t)$:	35
IV.5. mise en oeuvre d'un regulateur flou :.....	37
IV.5.1. Fuzzification des variables :	37
IV.5.2. Définition des règles d'inférence :	39
IV 5.3. Défuzzification de la sortie :.....	40
IV.6. Conclusion :.....	48
Conclusion générale.....	49

ANNEXE

BIBLIOGRAPHIQUE

IV.1 Introduction :

Dans notre d'étude, nous tentons de corriger un système non-linéaire. Le système est une masse M en sustentation magnétique. Il est donc composé d'une masse en acier maintenue en lévitation magnétique grâce au champ magnétique induit par une bobine. Le but de l'asservissement étant de maintenir la masse dans une position verticale donnée.

On envoie un courant dans la bobine afin de créer une force magnétique. Cette force est fonction du courant qui la traverse ainsi l'inductance de la bobine. Cette inductance dépend quand elle, de la position de la masse. L'équilibre mécanique est atteint quand la force exercée par la bobine s'annule avec la force de pesanteur de la masse. Un capteur optique détecte la position de la masse

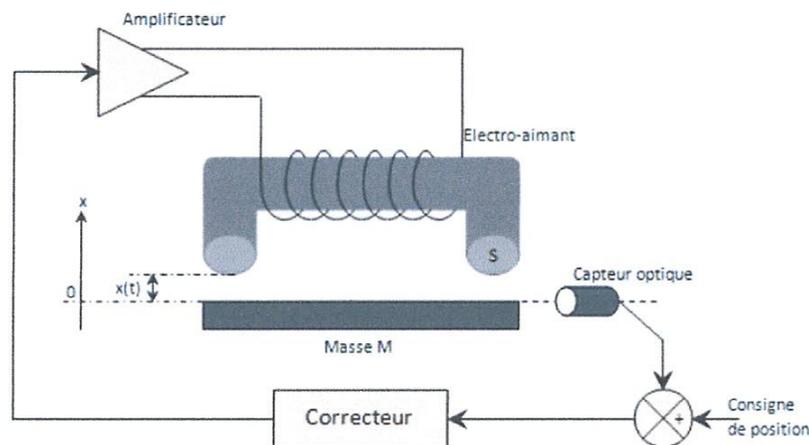


Figure.VI.1. Schéma de système

L'asservissement consiste à maintenir la partie mobile de masse M à une distance choisie x_0 de l'électro aimant.

$M = 1kg$: masse de la partie mobile,

$S = 5cm^2$: section de l'électro-aimant,

$N = 1000$: nombre de spires de la bobine de l'électro-aimant,

$r = 2\Omega$: résistance de la bobine de l'électro-aimant,

$x_0 = 5mm$: distance à asservir entre la partie mobile et l'électro-aimant. On rappelle que la perméabilité μ_0 de l'air est égale à $4\pi \cdot 10^{-7}$. Les perméabilités du matériau magnétique du noyau de l'électro-aimant et de la partie mobile sont supposées infinies

IV.2. Modélisation du processus :

IV.2.1. Expression de la force d'attraction F en fonction du courant dans la bobine I et de l'entrefer e :

La réluctance du circuit magnétique s'exprime par la relation suivante,

$$R = \int_e \frac{dl}{\mu_0 ds} + \int_e \frac{dl}{\mu_0 \mu_r ds}$$

Sachant que $\mu_r \rightarrow \infty$ on obtient :

$$R = \frac{2.e}{\mu_0.S}$$

L'induction électromagnétique s'écrit :

$$B = \frac{\phi}{S \cdot \cos(\phi)}$$

Avec ϕ l'angle entre les lignes de flux et la perpendiculaire à la surface S soit $\phi=0$, ce qui donne:

$$B = \frac{\phi}{S}$$

La force d'attraction s'écrit :

$$F = \frac{B^2.S}{\mu_0}$$

De plus, sachant que $N.I = R.\phi$, on peut écrire :

$$B = \frac{\phi}{S} = \frac{N.I}{R.S}$$

$$F = \frac{B^2.S}{\mu_0} = \left(\frac{N.I}{R.S} \right)^2 \cdot \frac{S}{\mu_0} = \frac{\mu_0.S.N^2.I^2}{4.e^2}$$

IV.2.2. Linéarisation du processus autour d'un point de repos $e(t) = e_0$

La force d'attraction F est fonction des variables que sont le courant I(t) dans la bobine et l'épaisseur e(t) de l'entrefer. On limitera l'étude en supposant que les déplacements de la masse sustentée restent faibles devant e0. Le système ainsi considéré peut se simplifier en un système linéaire décrit par la formule approchée suivante :

$$F(x, I) = F(x = e_0, I = I_0) + K_1.I(t) + K_2.x(t)$$

Sachant que $F = F_g$, l'expression du courant de maintien de la masse sustentée à une distance $x = e_0$

s'écrit :

$$I_0 = \frac{2.e_0}{N} \sqrt{\frac{Mg}{\mu_0.S}}$$

Les coefficients k_1 et k_2 ont pour expression :

$$k_1 = \frac{dF}{dI} = \frac{d}{dI} \left(\frac{\mu_0.S.N^2.I^2}{4.e^2} \right) = \frac{\mu_0.S.I_0.N^2}{4.e^2}$$

$$k_2 = \frac{dF}{dx} = -\frac{dF}{de} = -\frac{d}{de} \left(\frac{\mu_0.S.N^2.I^2}{4.e^2} \right) = \frac{\mu_0.S.I_0^2.N^2}{2.e^3}$$

Ces coefficients sont utilisés dans l'expression de la première équation de la dynamique,

$$\sum F = M.\gamma$$

Pour obtenir l'expression :

$$K_1.I(t) + K_2.x(t) = M.\frac{d^2x}{dt^2}$$

Fonction de transfert de processus :

L'électro-aimant peut être commandé soit en courant, soit en tension ; nous allons donc écrire l'expression des fonctions de transfert liant le déplacement $x(t)$ au courant $I(t)$ ainsi qu'à la tension de sortie de l'amplificateur $U(t)$.

Commande en courant de l'électro-aimant :

$$K_1.I(t) + K_2.x(t) = M.\frac{d^2x}{dt^2}$$

La transformée de Laplace de cette expression s'écrit :

$$K_1.I(p) + K_2.X(p) = M.p^2.X(p)$$

$$\frac{X(p)}{I(p)} = \frac{K_1}{M} \times \frac{1}{p^2 - \frac{K_2}{M}} = \frac{b_0}{p^2 - a_0}$$

$$\begin{cases} b_0 = \frac{K_1}{M} \\ a_0 = \frac{-K_2}{M} \end{cases}$$

Commande en tension de l'électro-aimant :

$$U(t) = r.I(t) + \frac{d\phi(t)}{dt}$$

Avec :

$$\begin{cases} \frac{dI(t)}{dx} = L(t)I(t) \\ L(t) = L_0 - \frac{dL(t)}{dx} \end{cases}$$

Ceci donne comme expression de la tension de commande :

$$U(t) = r.I(t) + L_0 \cdot \frac{dI(t)}{dt} - I_0 \cdot \frac{dL(t)}{dx} \cdot \frac{dx(t)}{dt}$$

$$L = \frac{N \cdot \phi}{I} = \frac{N^2}{R} = -\frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot S}{2 \cdot e^2}$$

$$\frac{dL}{dx} = -\frac{dL}{de} = -\frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot S}{2 \cdot e^2}$$

$$U(t) = r.I(t) + L_0 \cdot \frac{dI(t)}{dt} - \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot S \cdot I_0}{2 \cdot e^2} \cdot \frac{dx(t)}{dt}$$

Et par conséquent :

$$U(t) = r.I(t) + L_0 \cdot \frac{dI(t)}{dt} - K_1 \cdot \frac{dx(t)}{dt}$$

La transformée de Laplace de cette expression s'écrit :

$$U(p) = r.I(p) + L_0 \cdot I(p) - K_1 \cdot p \cdot X(p)$$

Sachant que :

$$\frac{X(p)}{I(p)} = \frac{K_1}{M} \times \frac{1}{p^2 - \frac{K_2}{M}}$$

On obtient la fonction de transfert suivante liant le déplacement à la tension de commande de l'électro-aimant :

$$\frac{X(p)}{I(p)} = \frac{K_1}{K_1^2 \cdot p + (r + L_0 p)(M \cdot p^2 - K_2)} = \frac{b_0}{a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0}$$

$$\begin{cases} b_0 = K_1 \\ a_3 = L_0 \cdot M \\ a_2 = r \cdot M \\ a_1 = K_1^2 - K_2 \cdot L_0 \\ a_0 = -r \cdot K_2 \end{cases}$$

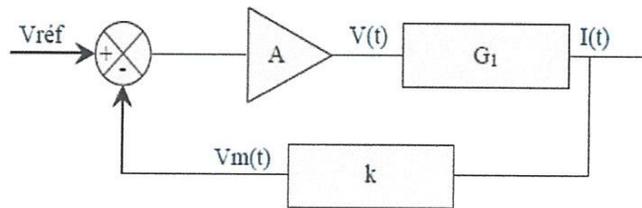
Application numérique :

$$\begin{cases} K_1 \approx 14 \\ K_2 \approx 3914 \\ L_0 \approx 50mH \\ I_0 \approx 1.4A \end{cases}$$

IV.3 Asservissement de l'amplificateur de courant :

Le processus d'attraction électromagnétique est intrinsèquement instable. Pour corriger cette instabilité le courant dans la bobine de l'électro-aimant doit pouvoir être modifié très rapidement lors d'un écart de position $x(t) \neq 0$. Par conséquent, avant même d'asservir la position $x(t)$, nous allons nous intéresser à asservir le courant $I(t)$ dans la bobine de l'électro-aimant.

Synoptique de l'asservissement du courant $I(t)$:



On considère que l'inductance $L = L_0$, est constante.

L'image du courant dans la bobine est produite par un procédé de mesure de gain de conversion k égal à 0.04 fournissant une tension $V_m(t)$

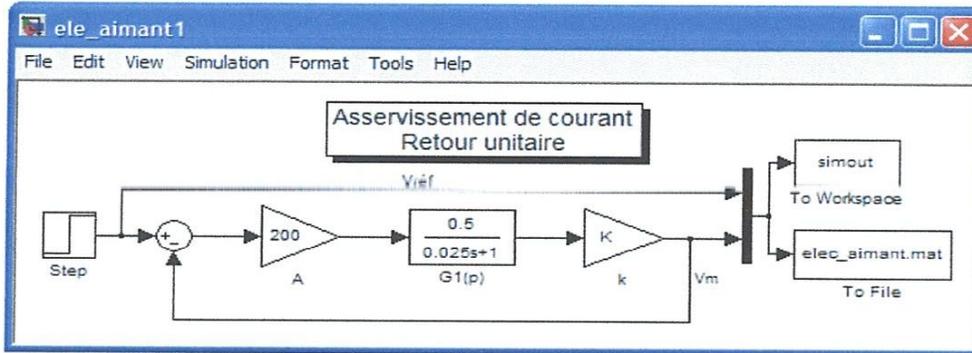
$$G(p) = \frac{I(p)}{V(p)} = \frac{1}{r + L_0 \cdot p} = \frac{1}{1 + \tau \cdot p} = \frac{0.5}{1 + 0.025 \cdot p}$$

Pour obtenir I_0 égal à 1.4 A, il faut imposer comme référence $V_{réf} = 56mV$.

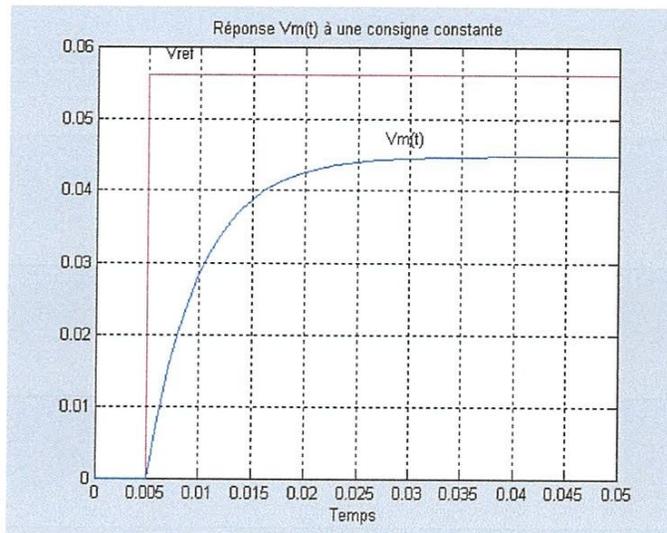
La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$\frac{V_m(p)}{V_{ref}(p)} = \frac{k.K.A}{1+k.K.A} \times \frac{1}{1 + \frac{\tau}{1+k.K.A} \cdot p}$$

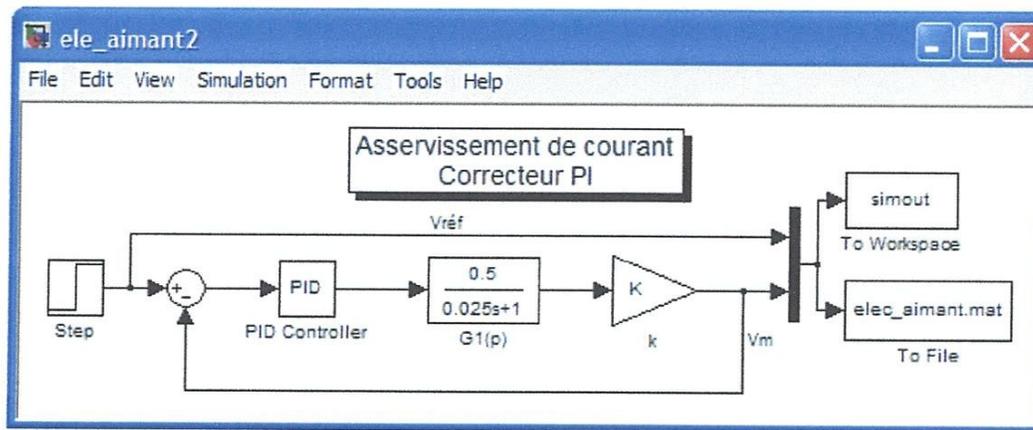
Si l'on s'impose de diminuer la constante de temps du processus à 5 ms, le gain A doit prendre la valeur 200.



-Réponse indicielle du système



La simulation de la réponse indicielle permet de constater que la constante de temps du processus asservi du premier ordre correspondant au temps nécessaire pour atteindre 63% de la valeur finale de V_i donne bien 5 ms. Par contre, l'erreur statique est importante ; pour corriger celle-ci sans avoir recours à une valeur d'amplification A très importante, on envisage d'utiliser un correcteur proportionnel et intégral. Pour cela on utilise le bloc SIMULINK du PID analogique en fixant l'action dérivée à 0.



Le correcteur PI est de la forme :

$$G(p) = A + \frac{I}{p}$$

La fonction de transfert du système asservi s'écrit donc :

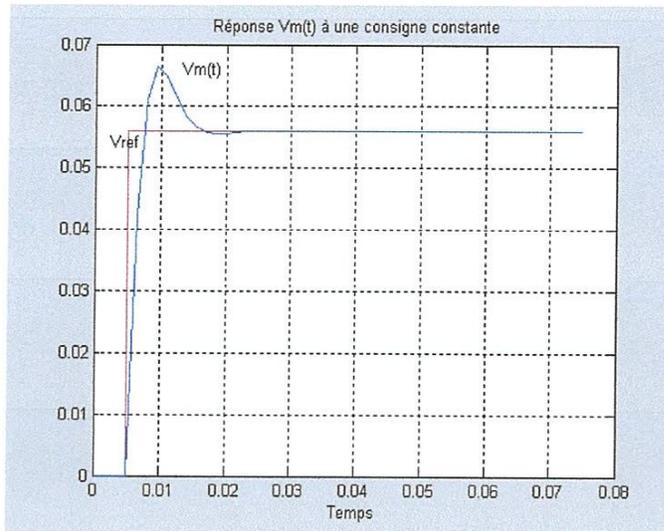
$$\frac{Vm(p)}{Vref(p)} = \frac{1 + \frac{A}{I} \cdot p}{1 + \frac{(1 + k \cdot K \cdot A)}{k \cdot K \cdot I} \cdot p + \frac{\tau}{1 + k \cdot K \cdot A} \cdot p^2}$$

La pulsation propre et de facteur d'amortissement de cette expression s'écrivent :

$$\begin{cases} \omega_0 = \sqrt{\frac{k \cdot K \cdot I}{\tau}} \\ \xi = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 + k \cdot K \cdot A}{\sqrt{k \cdot K \cdot I \cdot \tau}} \end{cases}$$

Si l'on s'impose d'obtenir une pulsation propre de 500 rd/s et un coefficient d'amortissement $\xi = 0.7$ on obtient comme paramètre de réglage du correcteur :

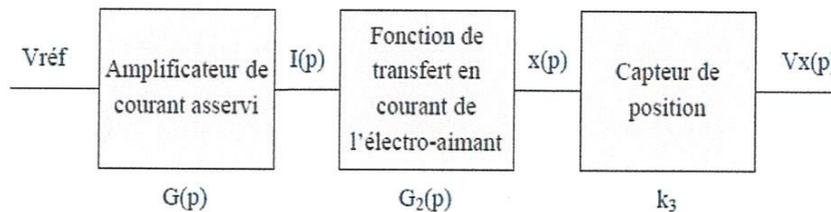
$$\begin{cases} A = 825 \\ I = 312500 \end{cases}$$

-Réponse indicielle du système corrigé**IV.4. Modèles analogique et discret de l'asservissement de la position $x(t)$:**

On intègre à présent l'asservissement du courant dans une boucle de commande de la position $x(t)$.

Le capteur de position $x(t)$ est supposé linéaire autour du point de fonctionnement $x = 0$ et génère une tension image de la position $Vx(t)$. Sa sensibilité de 1 V/mm correspond à un gain de conversion $k_3 = 1000 \text{ V/mm}$.

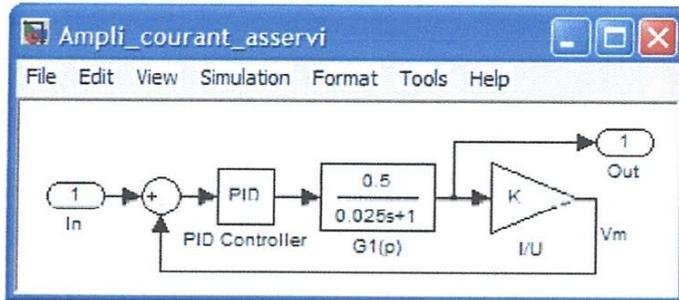
On note $G(p)$ la fonction de transfert de l'amplificateur de courant asservi précédemment étudié.



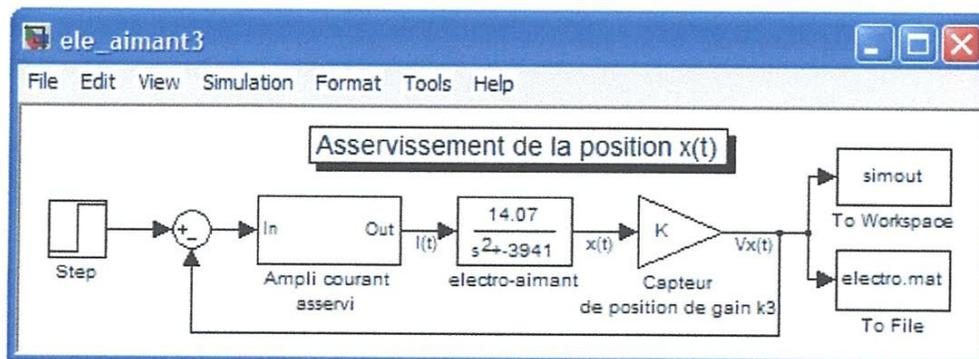
La fonction de transfert de la chaîne directe présentée ci-dessus s'écrit donc

$$\frac{V_m(p)}{V_{ref}(p)} = \frac{k_1 \cdot k_3}{kM} \times \frac{1 + \frac{A}{I} \cdot p}{\left(1 + \frac{(1 + k \cdot K \cdot A)}{k \cdot K \cdot I} \cdot p + \frac{\tau}{1 + k \cdot K \cdot A} \cdot p^2\right) \left(p^2 - \frac{K_2}{M}\right)}$$

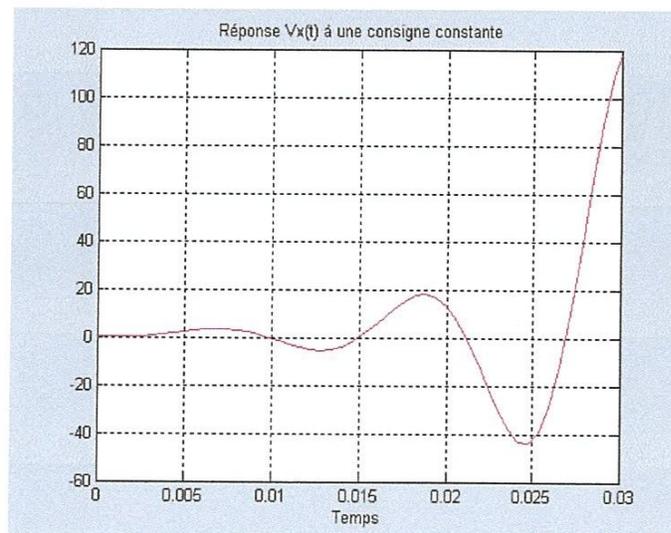
Pour la création du modèle SIMULINK de la commande de position, la partie asservissement en courant sera encapsulée pour devenir un sous-système.



Le modèle SIMULINK de l'asservissement de position avec retour unitaire se présente comme suit :



Le résultat de la simulation avec une consigne constante vérifie l'état instable du processus.



Afin de remédier au problème d'instabilité nous allons utiliser un régulateur flou pour asservir ce processus.

IV.5. mise en oeuvre d'un régulateur flou :

L'avantage considérable d'un régulateur flou est sa robustesse, elle est particulièrement importante lorsqu'il s'agit d'asservir un processus intrinsèquement instable. Le régulateur flou comportera 2 entrées, $e(t)$ représentant l'écart entre la consigne de position et la mesure de celle-ci et $de(t)$ dérivée de $e(t)$ permettant ainsi au régulateur flou la correction de l'erreur statique. La sortie de commande sera appelée Vc .

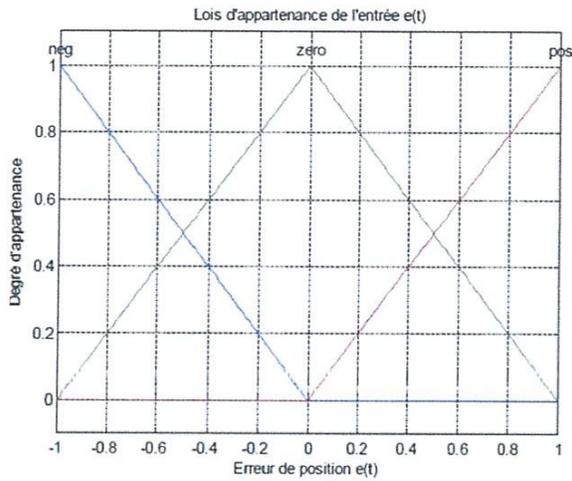
Les domaines de chacun de ces 3 signaux sont choisis comme suit :

$$\begin{aligned} -1 < e < 1 \\ -100 < de < 100 \\ -1 < Vc < 1 \end{aligned}$$

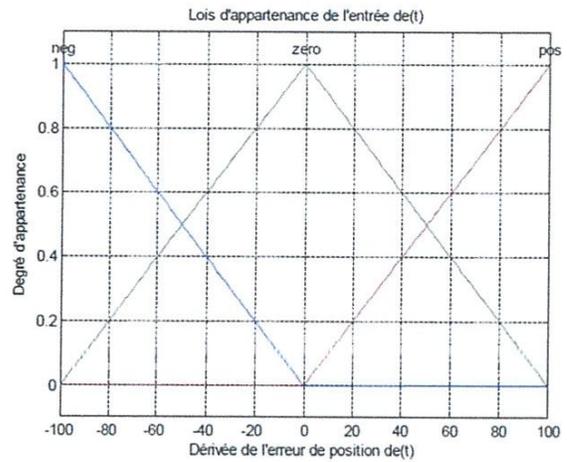
IV.5.1. Fuzzification des variables :

On définit pour chaque entrée 3 fonctions d'appartenance trapézoïdales trapmf que l'on nomme neg pour négative, zéros pour nulle et pos positive. Pour la sortie on définit 5 fonctions d'appartenance également trapézoïdales (GN pour grande négative, N pour négative, Z pour nulle, P pour positive et GP pour grande positive). Le régulateur flou crée à l'aide de l'éditeur graphique sera nommé EA.fis. Les commandes suivantes permettent de représenter ces ensembles flous.

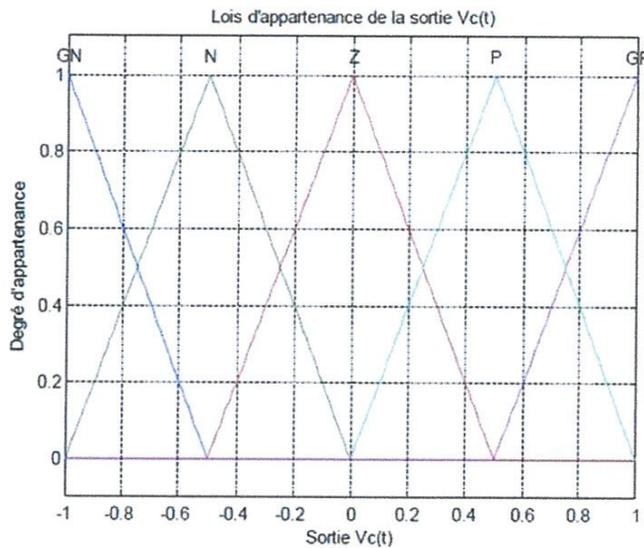
**Lois d'appartenance de l'entrée
« erreur de position »:**



**Lois d'appartenance de l'entrée
« dérivée de l'erreur de position »:**



Lois d'appartenance de la sortie « Commande de l'électro-aimant »:



On utilise la méthode de Mamdani qui utilise l'opérateur \min pour le ET et l'opérateur \max pour le OU.

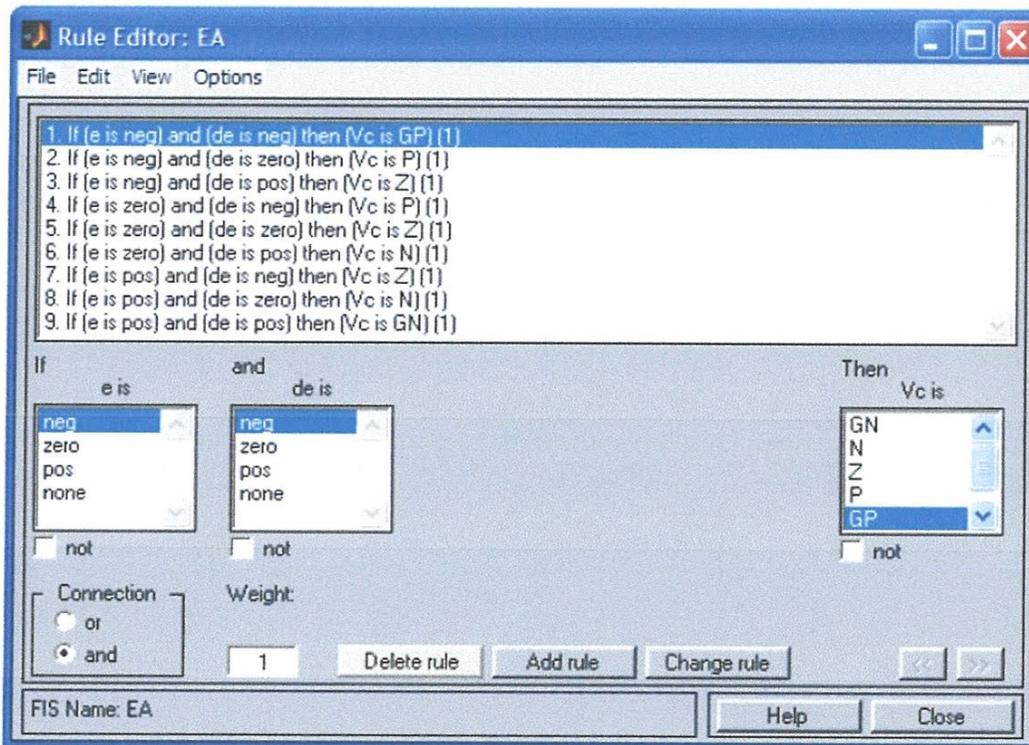
IV.5.2. Définition des règles d'inférence :

On dispose de 2 entrée ayant chacune 3 lois d'appartenance ce qui aboutit à 9 règles. Ces 9

règles sont définies dans la table d'inférence suivante :

Vc	e	NEG	ZERO	POS
de		NEG	ZERO	POS
	NEG	GP	P	Z
	ZERO	P	Z	N
	POS	Z	N	GN

La commande `ruleview` permet de visualiser les règles éditées en mode verbeux



IV.5.3. Défuzzification de la sortie :

On utilise la méthode la plus usuelle correspondant au calcul du centre de gravité, retenue pour sa précision.

Le synoptique du système flou est obtenu à l'aide de la commande `plotfis`

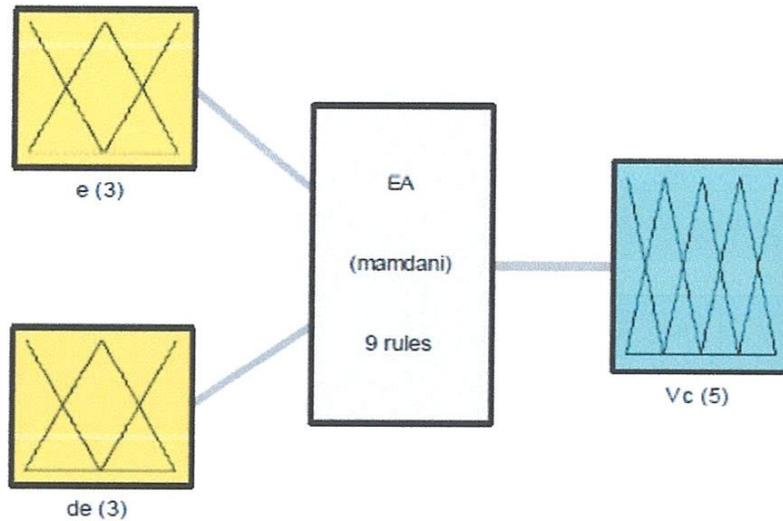
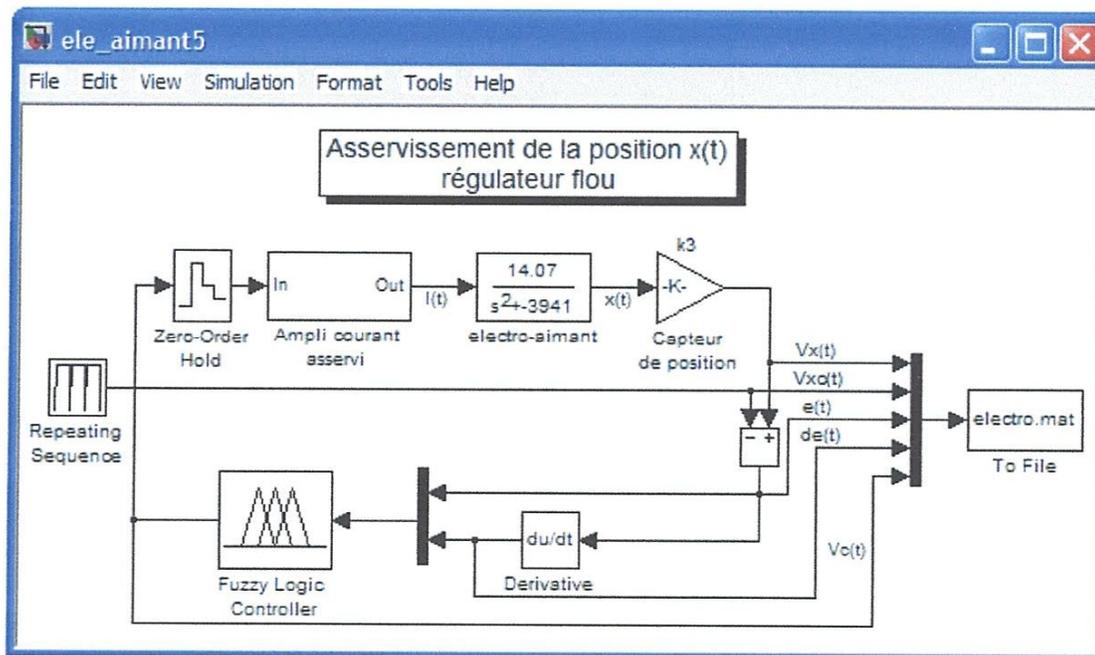
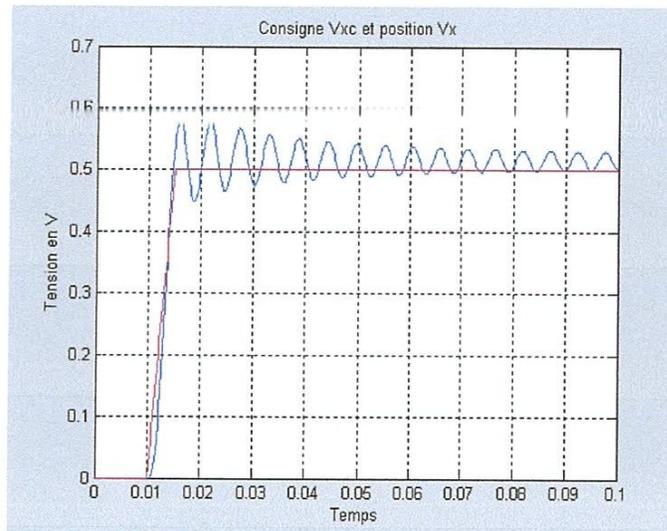


Figure.V.1: System EA: 2 inputs, 1 output, 9 rules

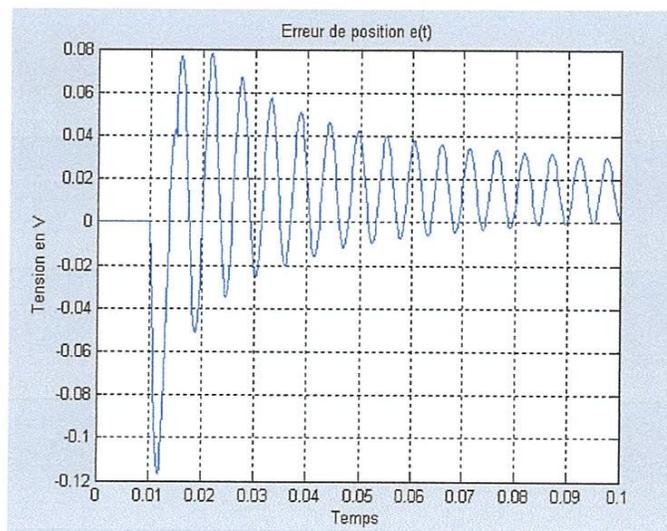
Le modèle SIMULINK du processus discrétisé par un bloqueur d'ordre zéro et asservi à l'aide du régulateur flou présenté ci-après.



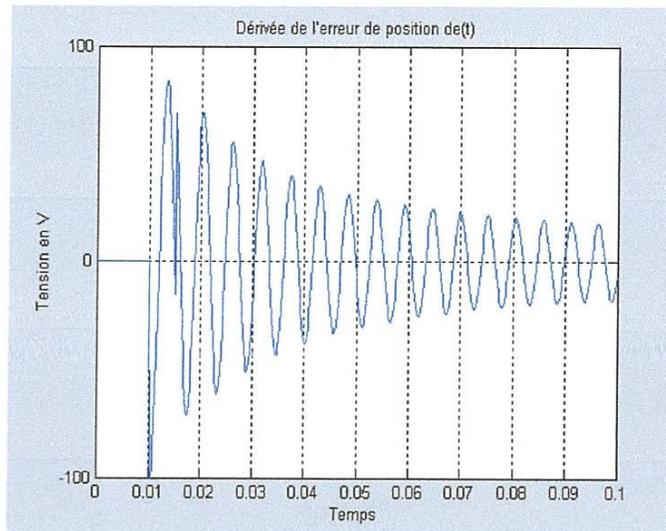
On applique une consigne de type échelon mais présentant une pente de transition non infinie afin d'éviter une réaction trop brutale du bloc « dérivée ». Le processus répond rapidement puis oscille légèrement au dessus de la position de consigne, l'amplitude des oscillations est de 15mV soit un battement de la partie mobile de 0.03 mm. Pour atténuer ce phénomène de battement il faudrait amortir un peu plus le processus lorsque la position se situe autour de zéro. Pour cela il suffit de diminuer la pente de la loi d'appartenance Z de la sortie.



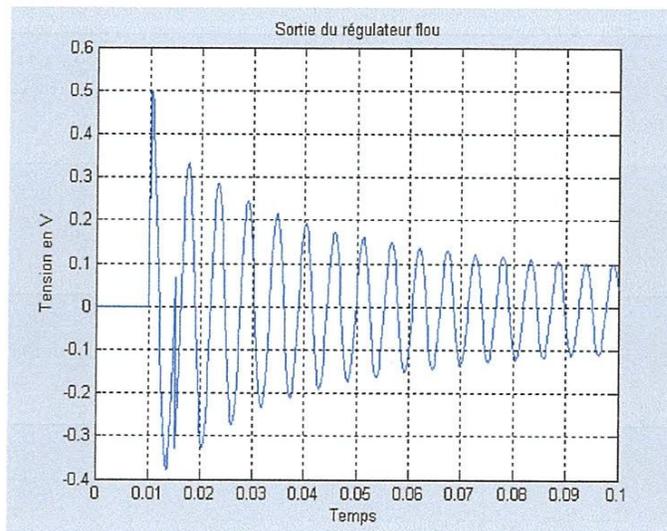
- Évolution de l'erreur de position :



- Evolution de la dérivée de l'erreur de position :



- La tension de commande de l'électro-aimant :



On modifie à présent les ensembles flous de la variable de sortie pour utiliser des lois d'appartenance gaussiennes afin d'augmenter l'amortissement du processus au voisinage de zéro. Le nouveau régulateur ainsi obtenu est sauvegardé sous le nom EA1.fis.

Régulateur flou, asservissement de la position de la masse

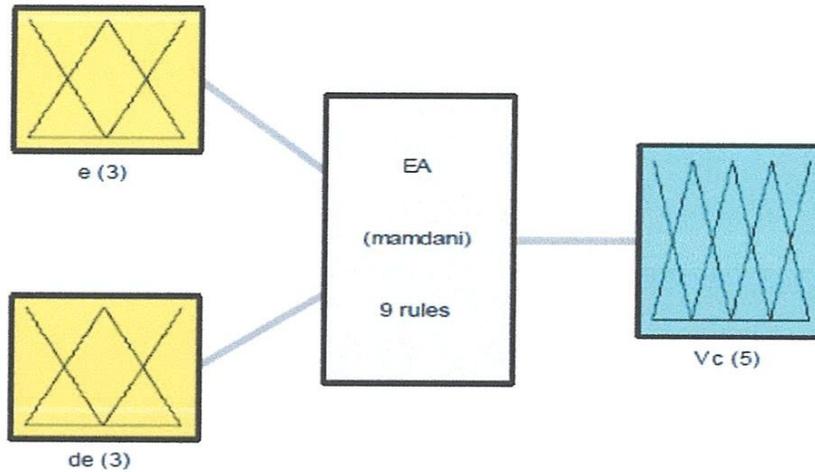
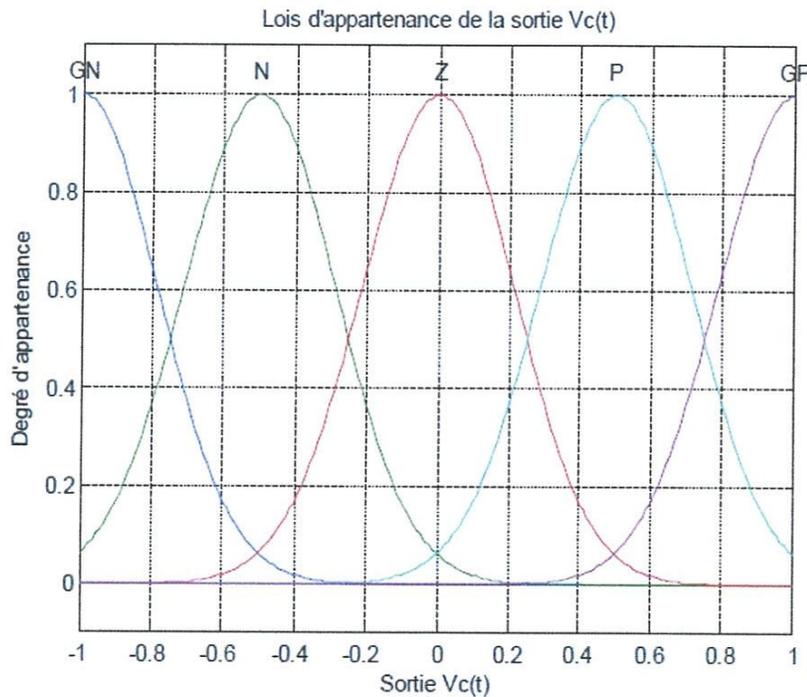
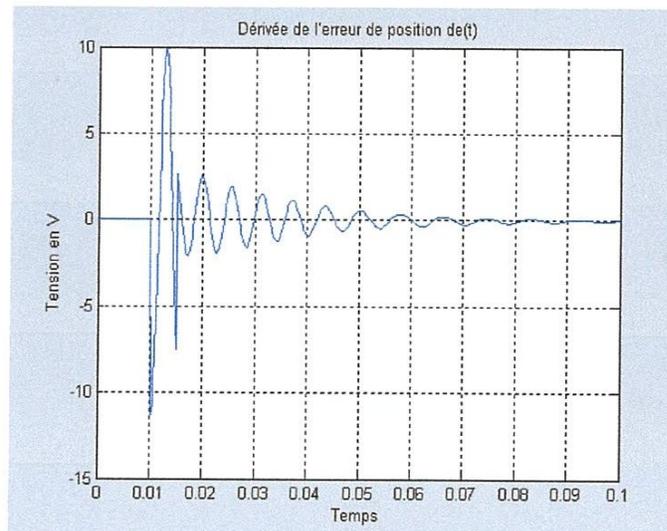
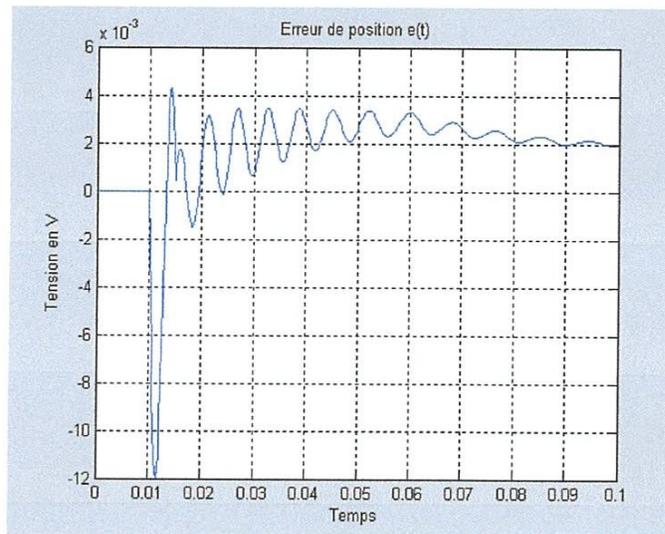
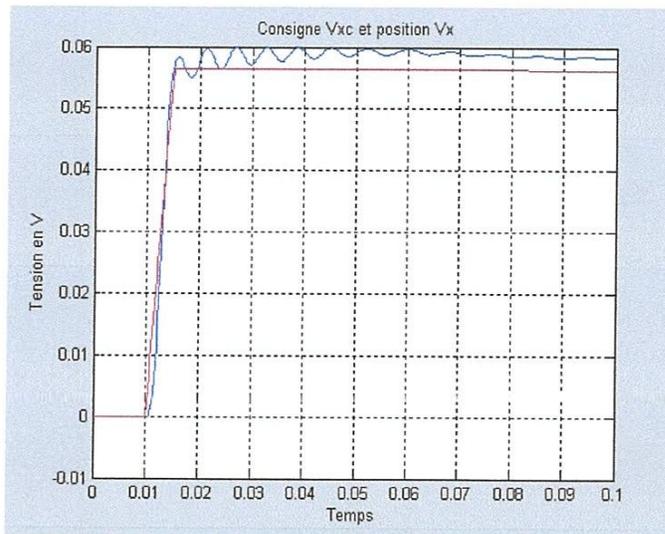


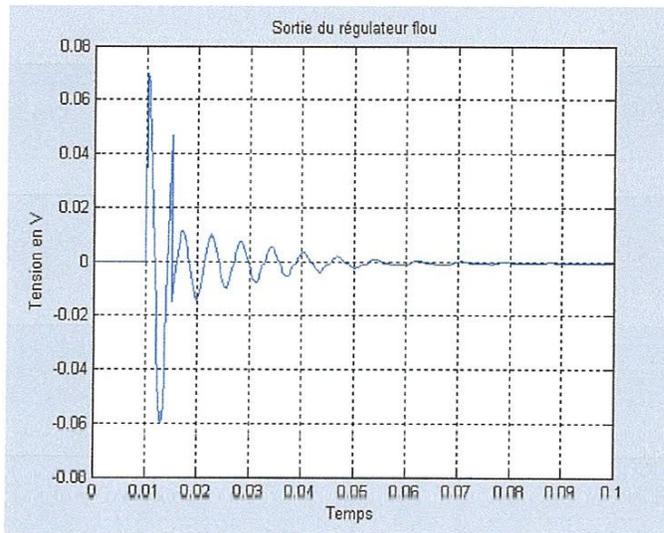
Figure.V.3: System EA1: 2 inputs, 1 outputs, 9 rules



La réponse du processus à la consigne précédente est plus amortie. Cependant l'erreur statique apparaît toujours avec une valeur moyenne identique nécessaire au maintien de la masse en sustentation. Cette commande nécessaire au maintien de la masse apparaît nettement sur le graphe de l'erreur $e(t)$.

Remarque : On changé la tension de consigne de 0.5V a 0.056V et on remplacé EA par EA1

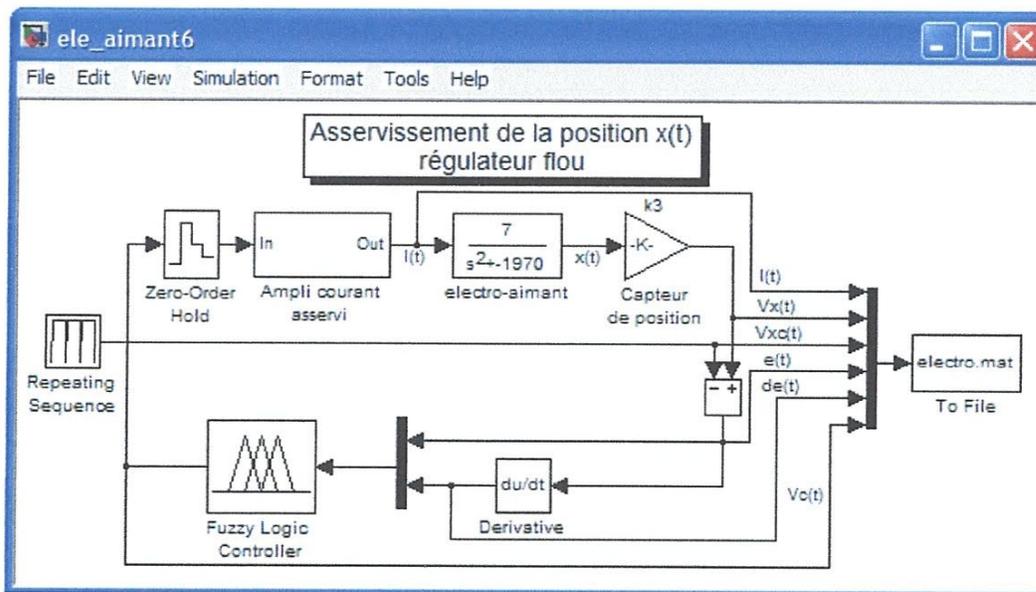




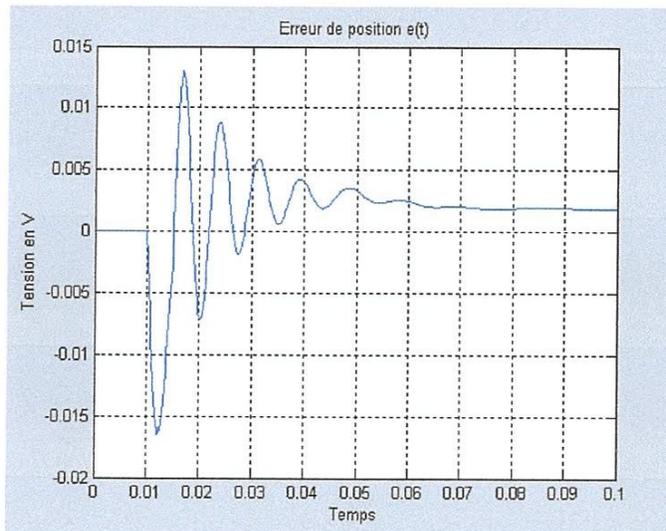
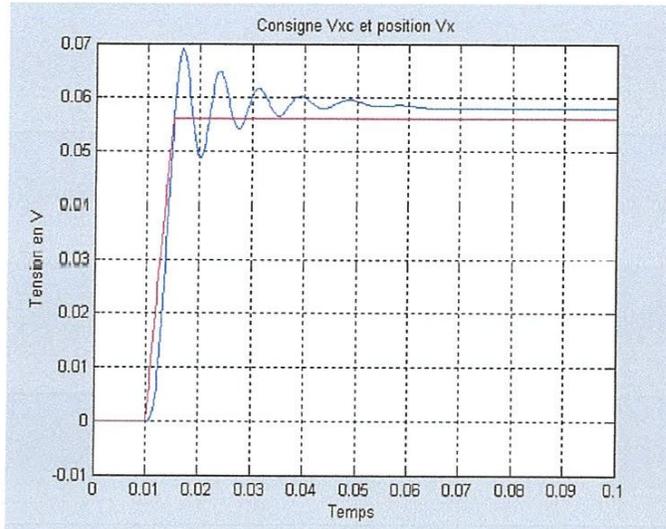
On peut vérifier la robustesse du système asservi en modifiant l'un des paramètres du processus, par exemple le poids de la masse suspendue. Modifions M en faisant passer sa masse de 1 kg à 2 kg les paramètres K et τ de la fonction de transfert en courant de l'électro-aimant prennent alors les valeurs suivantes :

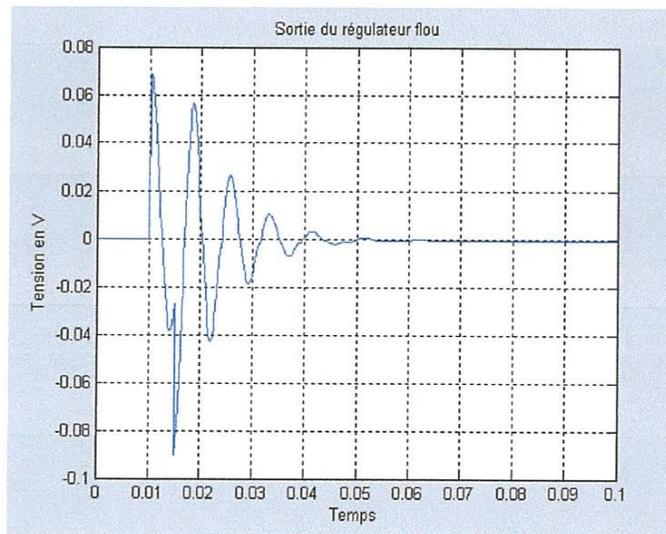
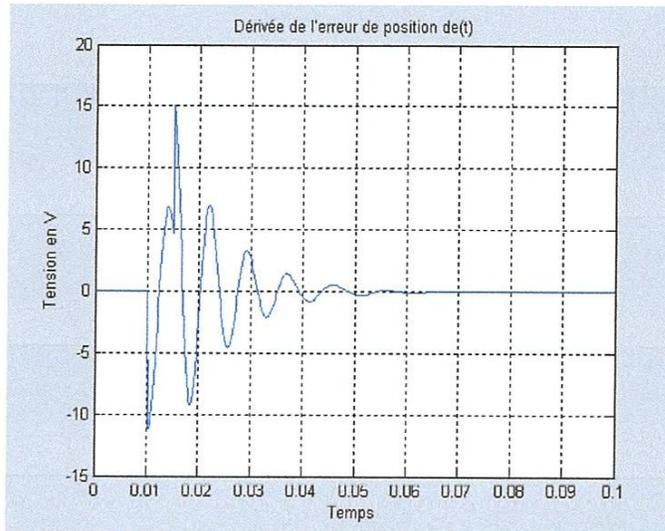
$$\begin{cases} b_0 = \frac{k_1}{M} = 7 \\ a_0 = -\frac{k_2}{M} = 1970 \end{cases}$$

On ajoute en plus sur le modèle SIMULINK la mesure du courant de commande I .

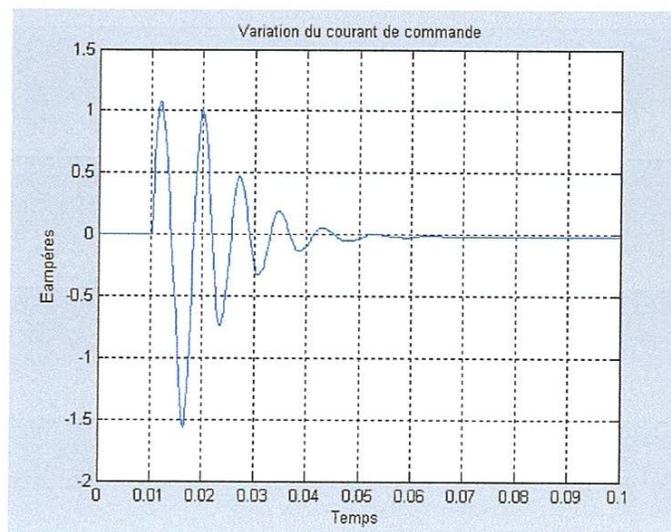


La simulation, toujours avec la même consigne, mais en utilisant le premier régulateur EA.fis, fait apparaître un dépassement augmenté dans la phase transitoire et un meilleur amortissement. Ces deux phénomènes sont des effets logiquement liés à l'augmentation de la masse suspendue laquelle, en l'occurrence, a été doublée.





L'augmentation de la masse sustentée accroît l'amplitude des oscillations de l'erreur dans la phase transitoire.



L'asservissement reste correct ce qui confirme la réputation de robustesse des régulateurs flous.

Si l'on s'impose de diminuer la constante de temps du processus à 5 ms, le gain A doit prendre la valeur 200.

IV.6.Conclusion :

L'utilisation d'un régulateur flou nous à permis d'asservir un processus intrinsèquement instable est qui est dans notre cas une sustentation électromagnétiques, aussi le régulateur flou reste insensible à la variation du poids de la masse, qui dans notre application à été doublée, se qui démontre ça robustesse.



Conclusion générale :

Les outils fournis par la logique floue permettent une modélisation des phénomènes pouvant en un certain sens s'approcher du raisonnement humain. Le fait de dépasser le tout ou rien des ordinateurs introduit une souplesse faisant la puissance des outils flous dans de nombreux domaines.

Mais même s'ils bénéficient d'un effet de mode, les algorithmes flous ne sont pas nécessairement les meilleurs.

Plus le système est complexe, plus les règles qui le régissent sont nombreuses et compliquées. Il s'agit là d'un obstacle majeur au contrôle en temps réel.

Elle apporte des solutions à des problèmes compliqués ou difficilement modélisables et elle n'a pas des méthodes générales de synthèses, alors il est nécessaire de varier à l'entrée et faire des tests jusqu'à atteindre la consigne.



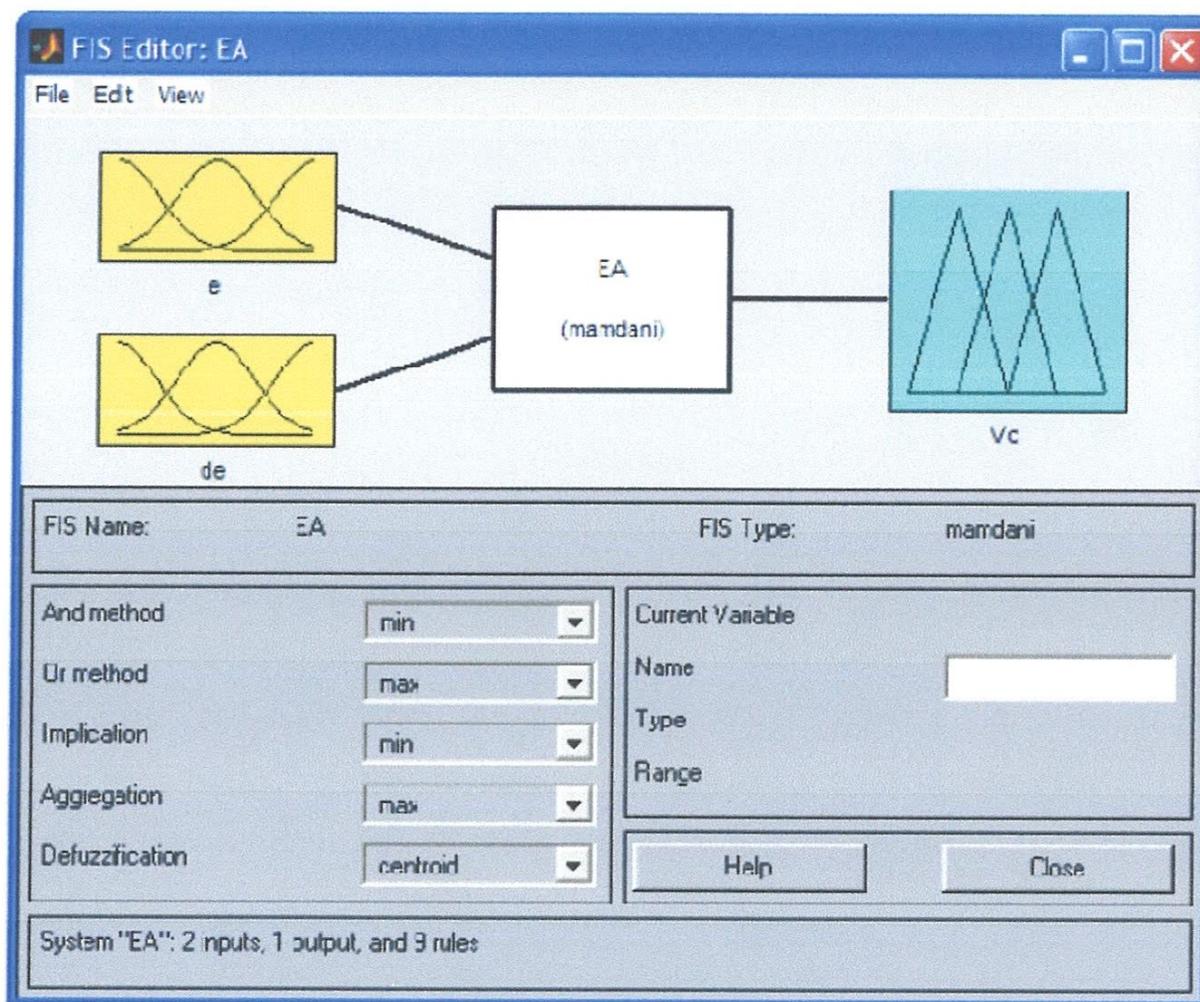
Annexe

Annexe

1. Utilisation de la boîte à outils « Fuzzy logic » :

On commence par taper *fuzzy* à l'invite de la fenêtre de commande de *MATLAB* : Ce qui lance l'éditeur de contrôleur flou : *Fis Editor*

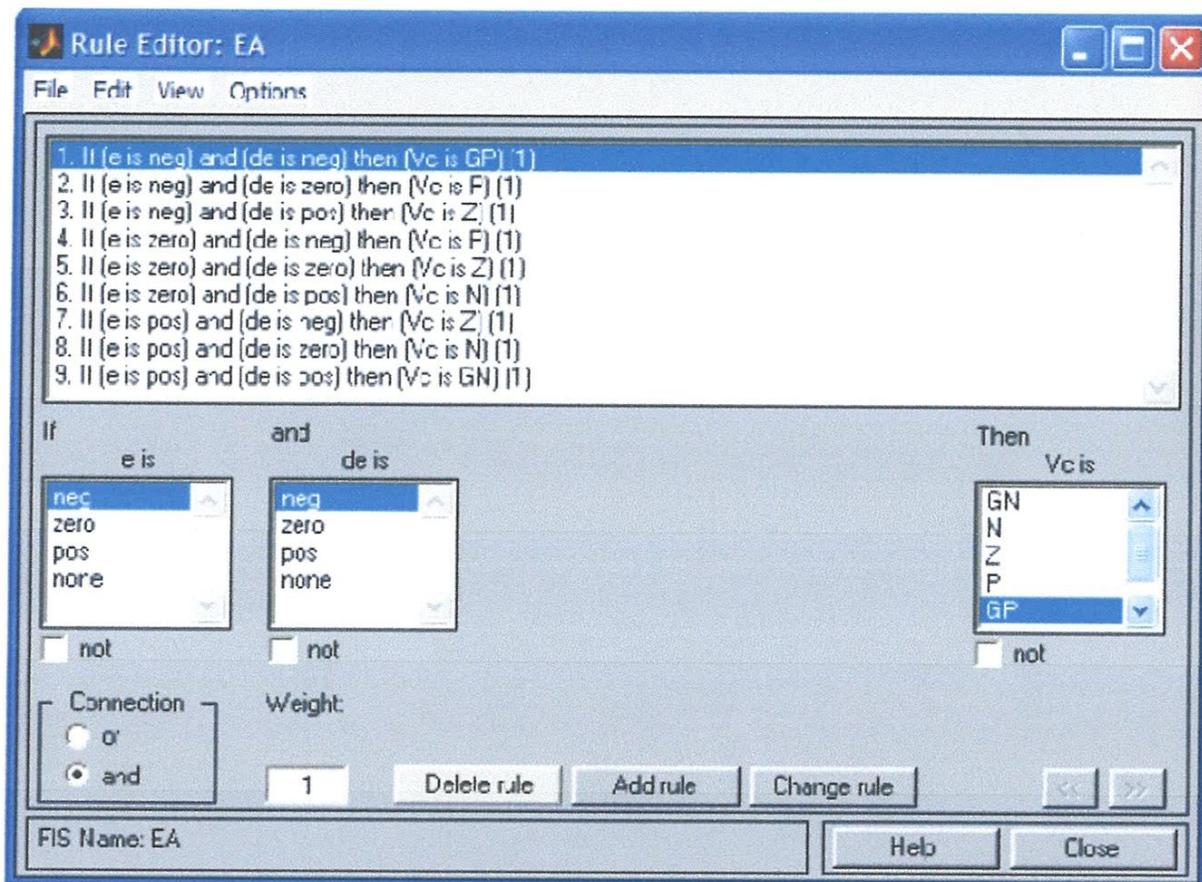
1.2. Opérations de fuzzification :



Etape 1 : La commande *Edit* permettra de choisir le nombre d'entrées-sorties (2 entrées et 1 sortie dans notre application). On pourra renommer à loisir ces différentes variables.

Etape 2 : Double-cliquer sur chaque variable d'entrée ou de sortie pour définir les valeurs linguistiques et la forme des fonctions d'appartenance. Pour cela utiliser dans le nouveau menu *Edit* la commande *Add MFs*, ce qui signifie ajouté des fonctions d'appartenance. On pourra choisir des fonctions triangulaires [*trimf*], trapézoïdales [*trapmf*], etc...

Etape 3 : Double-cliquer sur le bloc central (*Mandani*) pour entrer les règles d'inférences choisies.

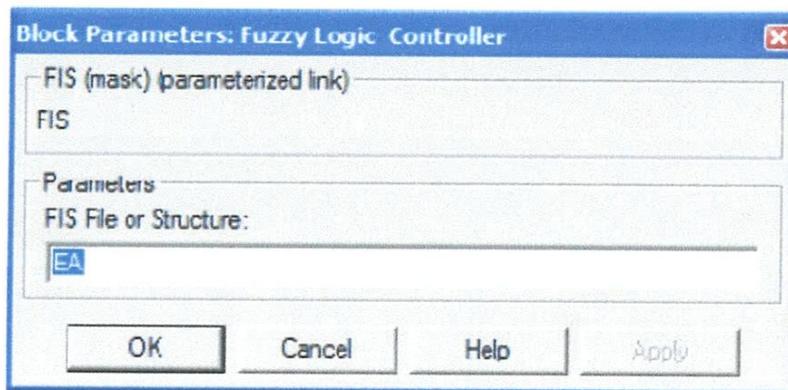


Etape 4 : Pour visualiser le comportement du contrôleur ainsi créé, on pourra utiliser dans le menu *View*, la commande *View rules*. Il est alors possible de fixer les valeurs des variables d'entrées, de voir quelles sont les règles d'inférences activées et de lire la valeur de la tension de commande correspondante.

1.2. Sauvegarde du contrôleur dans l'espace de travail MATLAB :

Pour que le contrôleur ainsi créé soit disponible dans un modèle SIMULINK, il faut qu'il soit sauvegardé dans l'espace de travail. Pour cela dans le menu *File*, utiliser l'option *Save to workspace* . Ainsi, son contenu sera mis dans un fichier de type «*.fis » (*EA.fis* dans l'exemple ci-dessus) auquel il sera fait appel dans *SIMULINK*.

Pour incorporer le correcteur flou dans son propre modèle *SIMULINK*, le plus simple est d'en copier un à partir d'une démo de *MATLAB*. Ensuite, on double-cliquera sur le modèle en entrant dans la fenêtre le nom du fichier (*EA* comme indiqué précédemment)



Le modèle définitif est (enfin !) prêt à fonctionner.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

[1]. B. Kamel " *introduction à la logique floue et à la commande floue*" cours Master 2 en Electronique Option Automatique. 2008

[2]. H. Bühler," *Réglage par logique floue,*" Presses polytechniques et universitaires romandes , Lausanne, 1994.

[3].BB.MEUNIER *,la logique floue et ses applications.* préface du professeur Lotfi A. Zadeh, Editions Addison_ Wesley France, SA. Copyright ©Octobre 1995.

[4]. L. Foulloy, S. Galichet et A. Titli , " *Commande floue1, de la stabilisation à la supervision,*" Lavoisier, 2003, hermès sciences.

[5]. F.Hachid et F.Farah ,"*Synthèse et implémentation pratique de lois de commandes non linéaires* " : Application à un simulateur d'hélicoptère ,"*Mémoire d'ingénieur D.D. E. ENP.* Alger.

[6].M. Mokhtari, M. Marie "*Applications de MATLAB 5 et SIMULINK 2*" 33454-Dépôt légal : Août 1998.

[7]. <http://www.mathworks.com/products/fuzzylogic.html>

[8]. [http://www.mathools.net/MATLAB /fuzzy logic.html/index.html](http://www.mathools.net/MATLAB/fuzzy%20logic.html/index.html)

[9]. <http://www.mathworks.fr/products/controldesign/modanal.shtml>

[10]. <http://www.scribd.com/doc/18969235/La-regulation-industrielle>

[11]. <http://www.eruc.ulaval.ca/ptt15225>

[12]. <http://www.gala.univ-perp.fr/~polit/chap0.html>
