

Chapitre IV

Commande floue de la machine synchrone à aimants permanents à cinq phases

IV.1. Introduction

La logique floue a vu le jour après la logique booléenne. Cette dernière est basée sur le principe que toute proposition ne peut être que vraie ou fausse (tout ou rien), et pourtant la pensée humaine est beaucoup plus complexe et plus nuancée qu'un ensemble rigide de lois car, pour un être humain, le mot "rien" n'est pas tout à fait blanc ou noir, on trouve dans notre langage habituel "assez grand, presque chaud, pas chaud...etc". Alors, les propositions nécessitent un élargissement à la logique classique.

C'est donc en 1965, que la logique floue est apparue avec la publication par Lotfi Zadeh de l'université de Californie, Berkeley, USA, d'un article intitulé "les ensembles flous" [16].

Les premières applications de la logique floue étaient confinées dans des domaines non techniques, comme le commerce et la gestion, et ce n'est qu'en 1974 qu'elle s'est appliquée en automatique par E. H. Mamdani qui a commencé par la réalisation du premier contrôleur flou. Dans cette première section, nous traitons deux notions fondamentales : la logique floue et flous et les sous-ensembles.

IV.2. Théorie de la logique floue

IV.2.1. Définition

Le terme «logique floue » à deux aspects : Le première correspond à tous les développements concernant la théorie des ensembles flous.

Le deuxième représente une extension de la logique classique dans le but de raisonner sur des connaissances imparfaites.

Afin de connaître le principe fondamental de la logique floue, on introduit un exemple simple, celui de la classification des personnes en trois ensembles « jeune », « entre deux âges » et « âgé ».

Pour le cas de la logique classique (logique de boucle) qui admet deux valeurs 0 ou 1, la classification pourrait se faire comme dans la figure (IV.1). Toutes les personnes âgées de moins de 30 ans appartiennent à l'ensemble jeune et toutes les personnes âgées de plus 50 ans sont considérées comme appartenir à l'ensemble « âgé ».

Cependant une telle logique de classification n'est même pas logique car la question qui se pose : pourquoi une personne âgée de 50 ans doit être considérée comme appartenant à l'ensemble « âgé »? En réalité un tel passage ce fait progressivement et individuellement. En outre lors de la classification par logique classique on ne prend pas en considération des personnes situées dans la zone « entre deux ages ».

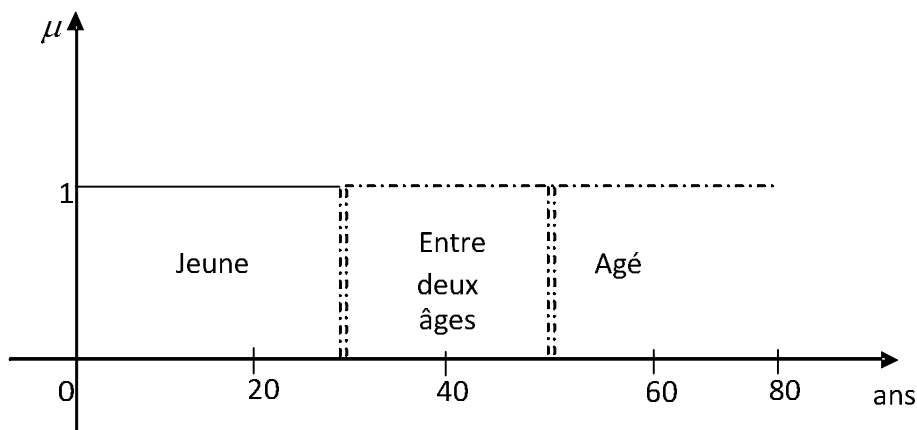


Figure (IV. 1) : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique classique

La logique floue, dont la fonction d'appartenance peut prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 1 permet de tenir compte de cette réalité. Il est donc possible de trouver une autre classification pour l'exemple précédant à l'aide de la logique floue. Les limites ne varient pas soudainement mais progressivement comme le montre la figure (IV.2).

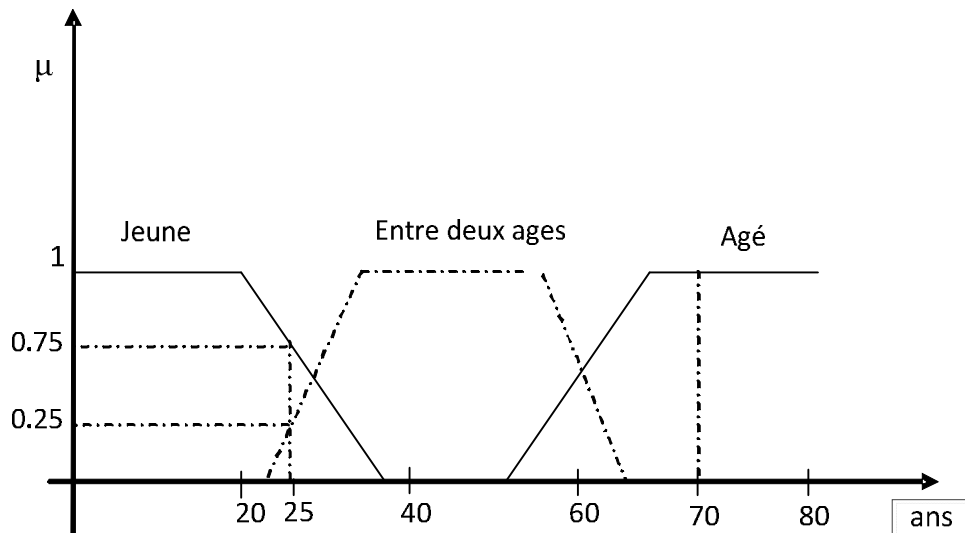


Figure (IV. 2) : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue

Une personne de 25 ans appartient à l'ensemble « jeune » avec une valeur de la fonction d'appartenance $\mu = 0.75$ et à l'ensemble « entre deux âges » avec $\mu = 0.25$. Par contre, une personne de 70 ans appartient avec une valeur $\mu = 1$ à l'ensemble « âgé ».

IV.2.2. Ensembles flous

Si on désigne par F un ensemble flou dans un univers de discours U , cet ensemble flou est caractérisé par une fonction d'appartenance μ_F qui prend des valeurs entre 0 et 1 à la différence pour l'ensemble booléen qui prend deux valeurs 0 ou 1 (figure (IV.3)).

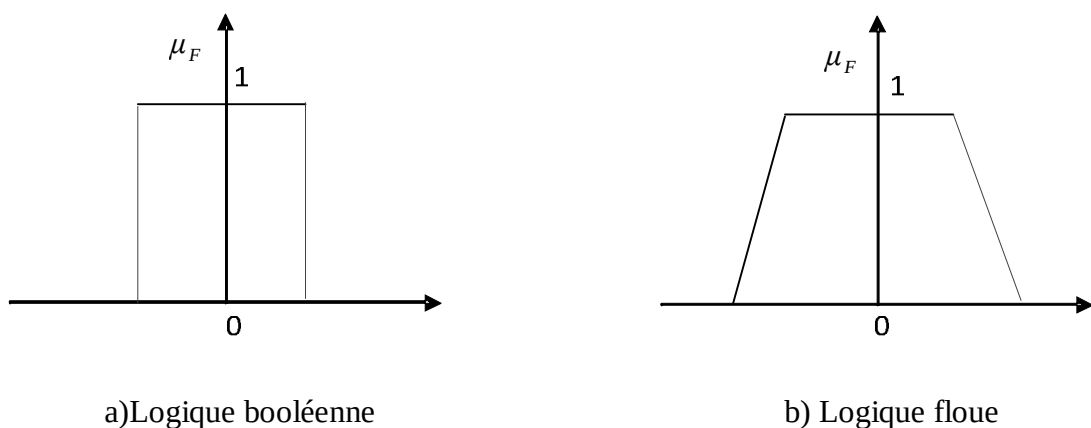


Figure (IV. 3) : Fonction caractéristique d'appartenance pour la logique booléenne et la logique floue

Pour la logique floue, la fonction d'appartenance peut être écrite sous la forme :

$$\mu_F : U \rightarrow [0 \ 1] \quad (IV.1)$$

$$F = \{(u, \mu_F(u)), u \in U\}$$

On peut avoir une autre forme de F comme :

$$\begin{cases} F = \int_u \frac{\mu_F(u)}{u} & \text{si } U \text{ est continu} \\ F = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_F(u_i)}{u_i} & \text{si } U \text{ est discret} \end{cases} \quad (IV.2)$$

Support : le support de l'ensemble flou F est l'ensemble numérique de tous les points u dans U tel que $\mu_F(u) > 0$.

Point de croisement : on appelle un point de croisement, l'élément u de U tel que $\mu_F(u) = 0.5$.

Singleton flou : si le support de l'ensemble flou contient un seul point $u \in U$ tel que $\mu_F = 1$, on dit qu'il est un singleton flou.

IV.2.3. Caractéristique d'un sous ensemble flou

Les caractéristiques d'un sous ensemble flou E_1 de U les plus utilisés pour décrire sont celles qui montrent à quel point il diffère d'un sous ensemble ordinaire de U [12].

IV.2.3.a. Support

Le support de E_1 est l'ensemble des éléments de U appartenant, au moins un peu à E_1 .

Définition : le support de E_1 , noté $\text{Supp}(E_1)$, est la partie U sur laquelle la fonction d'appartenance de E_1 n'est pas nulle :

$$\text{Supp}(E_1) = \{x \in U / \mu_F(x) \neq 0\}$$

IV.2.3.b. Hauteur

La hauteur de E_1 est le plus fort degré avec lequel un élément de U appartient à E_1 .

Définition : la hauteur, notée $h(E_1)$, du sous ensemble flou E_1 de U est la plus grande valeur prise par sa fonction d'appartenance :

$$h(E_1) = \sup_{x \in U} \mu_F(x)$$

On utilise souvent des sous ensemble flous normalisés. C'est-à-dire pour lesquels il existe au moins un élément de U appartient de façon absolue (avec un degré 1) à E_1 .

Définition : le sous ensemble flou E_1 de U est normalisé si sa hauteur $h(E_1)$ est égal à 1.

IV.2.3.c. Noyau

Un ensemble flou normalisé suppose qu'il existe des éléments de U typique de la propriété à laquelle il est associé. Ce sont les éléments appartenant de façon absolue E_1 . Dont l'ensemble est appelé le noyau de E_1 .

Définition : le noyau de E_1 , noté $\text{noy}(E_1)$, est l'ensemble des éléments de U pour lesquels fonction d'appartenance de E_1 vaut 1.

$$\text{noy}(E_1) = \{x \in U / \mu_F(x) = 1\}$$

IV.2.3.d. Cardinalité

Lorsque U est fini, on caractérise également le sous ensemble flou E_1 de U par sa cardinalité, qui indique le degré global avec lequel les éléments de U appartiennent à E_1 .

IV.2.4. Fonction d'appartenance

La fonction d'appartenance μ comprise entre 0 et 1 est associée au sous ensemble E_1 de $T(X)$ et à la variable X , dont l'ensemble des valeurs possible est $T(X)$. Elle s'appelle aussi, degré d'appartenance ou coefficient d'appartenance ou degré de possibilité, qui est la possibilité que la variable u ait la qualité associée au sous-ensemble E_1 . Elle est utilisée pour faire le traitement mathématique des variables linguistiques dans le but de traiter des déductions floues par ordinateur.

On attribue à chaque valeur de la variable linguistique des fonctions d'appartenances μ , une valeur déterminée pour la variable X sera désignée par facteur d'appartenance. Ils existent plusieurs formes de la fonction d'appartenance à s'avoir [12]:

a) Fonction triangulaire (figure IV.4-a)

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b < x \leq c \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{IV.3})$$

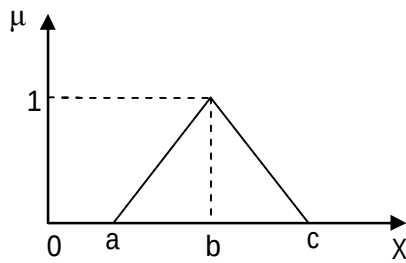
b) Fonction d'appartenance trapézoïdale (figure IV.4-b)

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & a < x \leq b \\ 1 & b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c < x \leq d \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{IV.4})$$

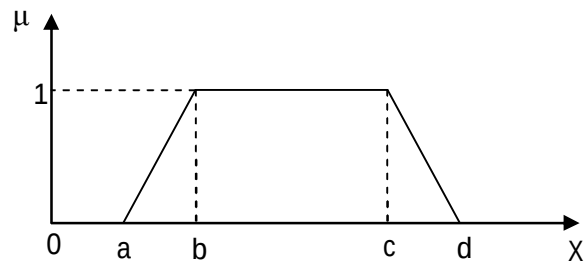
c) Fonction d'appartenance gaussienne (figure IV.4-c)

$$\mu(x) = \text{EXP} \left[- \left(\frac{x-m}{\delta} \right)^2 \right] \quad -\infty < x < +\infty \quad (\text{IV.5})$$

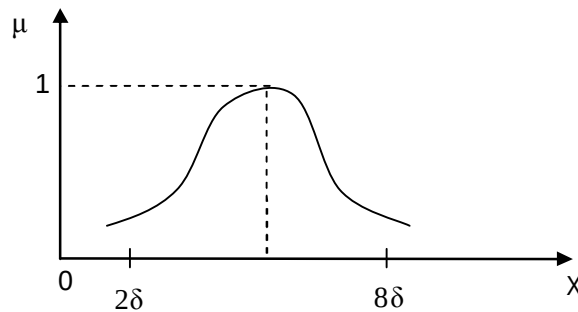
La figure (IV.4) représente les formes de ces trois types de fonctions d'appartenance.



a) Forme triangulaire



b) Forme trapézoïdale



c) Forme gaussienne

Figure (IV. 4) : Différentes formes des fonctions d'appartenance

IV.2.5. Variable linguistique

Une variable linguistique peut être vue soit comme une variable dont la valeur est un nombre flou, soit comme une variable dont les valeurs sont définies en termes linguistiques [13].

- **Nombre flou**

Un nombre flou f dans un univers de discours U continu est un ensemble flou normal et convexe dans U :

$$\begin{cases} \max_{u \in U} \mu(u) = 1 & \text{(normal)} \\ \mu_F(\lambda u_1 + (1-\lambda)u_2) \geq \min(\mu_F(u_1), \mu_F(u_2)) & \text{(convexe)} \\ u_1, u_2 \in U, \lambda \in [0, 1] \end{cases} \quad (IV.6)$$

- **Variable linguistique**

Une variable linguistique est caractérisée par un triplet $(x, T(x), u)$ ou :

x : le nom de variable

$T(x)$: ensemble de termes de variable, c'est l'ensemble des noms des valeurs linguistiques de x dont chaque valeur est un sous-ensemble flou défini dans U .

U : l'univers de discours.

Comme exemple de variable linguistique, on prend la vitesse de rotation du moteur. Son ensemble de termes T (vitesse) peut être :

$$T(\text{vitesse}) = \{\text{lente, moyenne, rapide, ...}\}$$

Ou chaque termes dans T (vitesse) est caractérisé par un ensemble flou dans un univers de discours $U = [0, 200]$ par exemple.

Pour les vitesses inférieures ou égales à 80 intervient la variable linguistique (lent), et pour les vitesses supérieures ou égales à 150 intervient la variable linguistique (rapide).

Ces deux termes peuvent être caractérisés comme des ensembles flous dont les fonctions d'appartenances sont montrées sur la figure (IV.5).

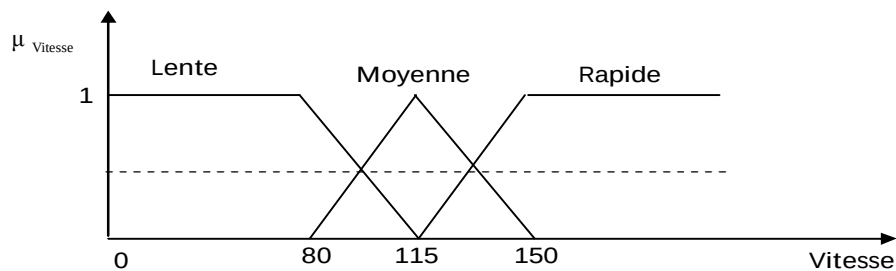


Figure (IV. 5) : Représentation des variables linguistiques

IV.2.6. Opérateurs de la logique floue

Les variables linguistiques sont liées entre elles au niveau des règles d'inférence 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. De plus, il existe l'opérateur NON qui s'appelle (complément, négation, inverse)

- **Opérateur OU (l'union)**

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

$$\mu_{A \cup B}(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (IV.7)$$

- **Opérateur ET (l'intersection)**

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

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (IV.8)$$

- **Opérateurs NON (complément)**

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

$$\mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u) \quad (IV.9)$$

- **Produit cartésien**

Soit $A_1, \dots, A_n$ des ensembles flous, dans les univers de discours $u_1, \dots, u_n$ respectivement.

Le produit cartésien de $A_1, \dots, A_n$ est un ensemble flou dans l'univers de discours

$u_1 \cdot u_2 \cdot \dots \cdot u_n$ dont sa fonction d'appartenance est exprimée par :

$$\begin{aligned} \mu_{A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n}(u_1, u_2, \dots, u_n) &= \min\{\mu_{A_1}(u_1), \dots, \mu_{A_n}(u_n)\} \\ \text{ou :} \\ \mu_{A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n}(u_1, u_2, \dots, u_n) &= \mu_{A_1}(u_1) \cdot \dots \cdot \mu_{A_n}(u_n) \end{aligned} \quad (IV.10)$$

- **Relation floue**

Une relation floue est un ensemble flou dans les univers de discours $u_1, \dots, u_n$. Elle est exprimée comme suit :

$$R_{u_1 \cdot u_2 \cdot \dots \cdot u_n} = \{(u_1, \dots, u_n), \mu_{R(u_1, \dots, u_n)} \mid (u_1, \dots, u_n) \in u_1 \cdot \dots \cdot u_n\} \quad (IV.11)$$

- **Composition sup-star**

Soit R et S deux relations floues dans les univers de discours $U \times V$ et $V \times W$ respectivement, la composition de R et S est une relation floue notée ROS telle que :

$$ROS = \left\{ \left[(u, w), \sup \left(\mu_{R(u,v)} * \mu_{S(v,w)} \right) \right] \mid u \in U, v \in V, w \in W \right\} \quad (IV.12)$$

Avec $*$ est un opérateur appartient à la norme triangulaire T-norme

IV.2.7. Logique floue et raisonnement approximatif

Règle compositionnelle sup-star pour inférence :

Si R est une relation floue dans $U \times V$ et si x est un ensemble flou dans U, alors la règle compositionnelle “sup-star” pour l’inférence affirme que l’ensemble flou y dans V peut se déduire par : $y = X \circ R$

Où $\circ$ représente sup-star composition.

IV.2.8. Implication floue

L’implication floue est un opérateur qui à pour but d’évaluer un degré de vérité d’une règle R sous la forme :

Si x est A alors y est B

Cette évaluation est donnée à partir des valeurs de la prémisse et celle de la conclusion.

$$\mu_R(x, y) = I(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (IV.13)$$

Où I est un opérateur d’implication.

IV.3. Contrôle à logique floue

L’idée principale de la commande logique floue est la règle de la commande linguistique. Qui peut prendre plusieurs formes. Cependant, elle indique invariablement quelle action de commande prendre face à une condition donnée. Cette condition peut être une diminution ou augmentation de la grandeur à régler, comme par exemple le cas du réglage de la vitesse d’une machine électrique.

La condition peut être une augmentation ou une diminution de la vitesse ou du couple, face aux variations paramétriques de la machine ou une variation du moment d’inertie de la partie tournante.

Ces actions de commande peuvent avoir la forme : «si l'erreur de vitesse est assez grande», «si la variation de l'erreur est trop petite» [13].

Les variables floues dans ce cas sont l'erreur et la variation de l'erreur, la sortie est la commande c'est la tension d'alimentation. Les mots clés sont « assez grande», « beaucoup», «trop petite»...qui représentent des informations imprécises mais utiles et sont représentées par un sous ensemble flou d'un univers de discours. Une règle de commande dans ce cas est la combinaison d'une condition et d'une action.

Le contrôleur à logique floue est un algorithme de conversion d'une stratégie de commande linguistique basée sur l'expertise humaine en une stratégie de contrôle automatique décrit par un ensemble de règles de contrôle flou du type :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 : \text{si } x \text{ est } A_1 \text{ et } y \text{ est } B_1 \text{ alors } Z \text{ est } C_1 \\ R_2 : \text{si } x \text{ est } A_2 \text{ et } y \text{ est } B_2 \text{ alors } Z \text{ est } C_2 \\ \vdots \\ R_n : \text{si } x \text{ est } A_n \text{ et } y \text{ est } B_n \text{ alors } Z \text{ est } C_n \end{array} \right. \quad (\text{IV.14})$$

Ces règles sont liées par le concept de l'implication floue et la règle compositionnelle "sup-star". Chaque règle de contrôle flou est représentée par une relation floue, le système flou est caractérisé par une seule relation floue qui est déterminée par la combinaison de toutes les règles floues à savoir :

$$R = \text{ALSO}(R_1, R_2, \dots, R_n) \quad (\text{IV.15})$$

La structure générale d'un contrôleur à logique floue est montrée par la figure (IV.6)

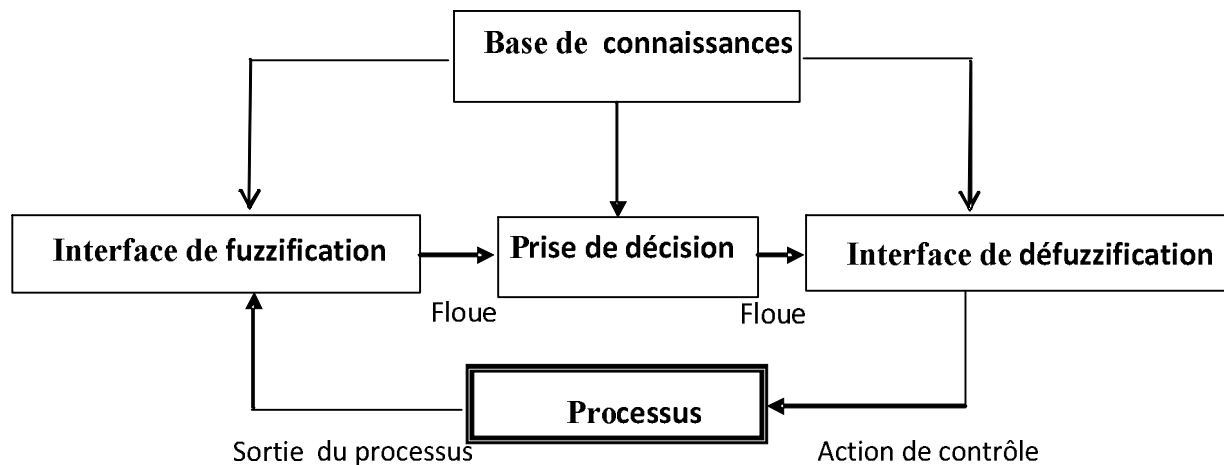


Figure (IV. 6) Synoptique d'un contrôleur flou [15]

IV.3.1. Interface de fuzzification

L'interface de fuzzification est un bloc qui consiste à :

- Mesurer les valeurs numériques des variables d'entrées ;
- Les projeter dans l'univers de discours en utilisant un facteur d'échelle ;
- Transformer ces valeurs numériques en valeurs linguistiques en utilisant des fonctions d'appartenances qui ont pour but de subdiviser l'espace d'entrée de l'univers de discours en sous ensembles flous [14].

IV.3.2. Base de connaissances

Elle contient les informations du domaine d'application et du contrôle. Elle est définie par les deux bases suivantes [14]:

a) Base de données

Elle fournit des informations nécessaires qui sont utilisées pour l'exploration des règles de contrôle flou ainsi que la manipulation des données dans le contrôleur flou.

b) Base de règle

Elle caractérise le but et la politique du contrôle flou via un ensemble de règles de contrôle flou.

IV.3.3. Logique de prise de décision (moteur d'inférence)

Ce bloc représente le noyau du contrôleur flou, qui est capable de simuler les décisions humaines basées sur le concept flou et d'inférer les actions de contrôle flou par intervention de l'implication floue et des règles d'inférence.

IV.3.4. Défuzzification

La défuzzification a pour but de :

Transformer les valeurs de la sortie situées dans l'univers du discours en valeurs réelles comprises dans le domaine de variation.

Extraire de la sortie de vérité la valeur numérique de la sortie [13].

IV.4. Conception d'un contrôleur à logique floue

Les étapes de conception d'un contrôleur à logique floue sont les suivantes :

IV.4.1. Stratégie de fuzzification

La fuzzification est fondée sur la théorie des ensembles flous et joue un rôle essentiel pour la manipulation des données dans un contrôleur flou. Elle consiste à convertir les valeurs

numériques à l'entrée du contrôleur en valeurs linguistiques via des fonctions d'appartenance et ce, par une projection de ces valeurs dans l'univers de discours U en utilisant un facteur d'échelle K_e .

On peut dire que la stratégie de fuzzification est un choix de l'univers de discours et des formes des fonctions d'appartenance.

- **Univers de discours**

L'univers de discours représente l'intervalle de variation des grandeurs d'entrée du contrôleur flou après une normalisation par un facteur d'échelle.

- **Facteur d'échelle**

Il s'agit d'un moyen de normalisation des grandeurs physiques dans un intervalle de $[-1 \ 1]$. Le facteur d'échelle doit être choisi sur la base de l'étude du système de sortie à condition que lors de petits phénomènes transitoires, le domaine admissible pour les grandeurs normalisées ne doit pas être dépassé. La figure (IV.7) représente l'univers de discours normalisé avec une partition 3, 5, 7 en utilisant un facteur d'échelle.

IV.4.2. Base de données

- **Normalisation**

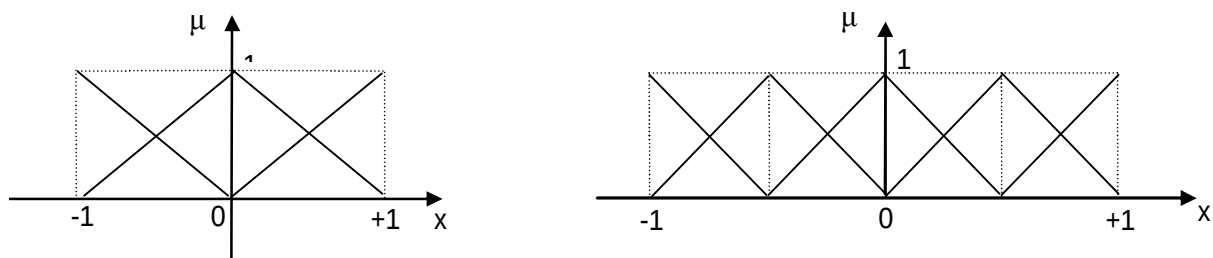
Elle consiste à normaliser l'univers de discours U dans un intervalle bien déterminé.

- **Partition floue de l'espace d'entrée et de sortie**

C'est la division de l'univers de discours en plusieurs ensembles flous.

IV.4.3. Base de règles

Il existe quatre possibilités pour l'exploration de la base de règles. La première est basée sur l'expertise humaine, la deuxième est fondée sur les actions de contrôle fournies par un opérateur, la troisième est l'utilisation du modèle flou du processus, la quatrième et la dernière qui est la plus récente, est basée sur un algorithme d'apprentissage pour l'élaboration des règles[23].



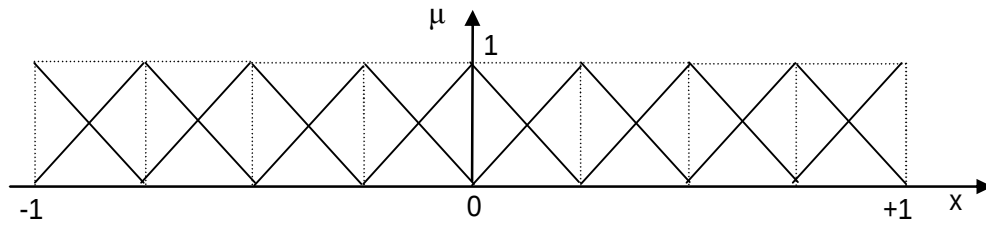


Figure (IV. 7) : Univers de discours normalisé dans l'intervalle $[-1 +1]$ avec une partition de 3, 5, 7 ensembles flous

IV.4.4. Inférence

Il existe deux types d'inférence :

- **Inférence à une seule règle**

C'est la comparaison de plusieurs concurrents dans une même situation et le résultat est le choix de l'optimum. Ce type d'inférence n'est pas utilisé pour le contrôle flou.

- **Inférence à plusieurs règles**

Dans ce type d'inférence, la prise de décision pour une ou plusieurs variables est différente pour chacune des variables. C'est l'inférence qui est utilisée dans les problèmes de réglage et de commande par logique floue. Les variables sont, soit des variables déterministes, ou des variables floues. L'exemple de réglage de la température d'un local est cité pour bien cerner ce type d'inférence [15].

La règle est la variation de la position de la valve, ainsi l'objet de réglage est de minimiser l'écart. Pour se faire, les étapes suivantes dites règles d'inférences sont appliquées.

$$\text{Si } e > 0 \text{ alors } \Delta U > 0 \text{ ou Si } e < 0 \text{ alors } \Delta U < 0 \text{ ou Si } e = 0 \text{ alors } \Delta U = 0$$

Avec ΔU : un variable flou

e : variable linguistique

Les décisions de la sortie ΔU sont données par expériences humaines, les règles d'inférences peuvent être représentées par la figure (IV.8).

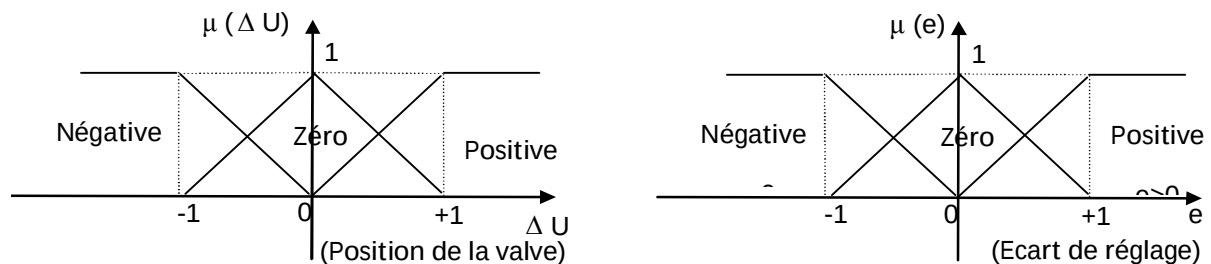


Figure (IV. 8) : Exemple d'inférence à plusieurs règles[15]

Notons que l'inférence est le bloc essentiel ou la stratégie de réglage dépend essentiellement des inférences adoptées. Elle lie les grandeurs mesurées qui sont les variables d'entrée (x) transformées en variables floues par la fuzzification en variable de sortie (x_R) qui est aussi une variable floue.

La formation concrète des règles d'inférence dépend évidemment du comportement statique et dynamique du système à règle et de l'organe de commande, ainsi que des buts de réglage envisagés. Sachant qu'il n'est pas possible d'indiquer des règles précises, l'expérience joue un rôle important.

• Traitement numérique des inférences

Après avoir établi toutes les règles d'inférence on peut les représenter par un tableau ou par une matrice. Un traitement numérique des inférences selon l'une des trois méthodes suivantes est à exécuter [13].

- 1) Méthode d'inférence max-min ;
- 2) Méthode d'inférence max-prod ;
- 3) Méthode d'inférence somme-prod.

Considérons un ensemble de deux règles définies par :

R_1 : si x est A_1 et y est B_1 , alors Z est C_1 ou

R_2 : si x est A_2 et y est B_2 , alors Z est C_2

1) Méthode d'inférence max-min

Cette méthode est appliquée au contrôleur dit de type «Mandani». Dans ce mode de raisonnement, la $i^{\text{ème}}$ règle aboutit à la décision de contrôle :

$$\mu_{Ri} = \mu_{RM}(\alpha_i, \mu_{ei}(Z)) = \min(\alpha_i, \mu_{ei}(Z))$$

$$\text{Avec } \alpha_i = \mu_{RM}(\mu_{Ai}(x_0), \mu_{Bi}(y_0)) = \min(\mu_{Ai}(x_0), \mu_{Bi}(y_0))$$

qui représente la valeur de vérité des règles d'inférences.

Le résultat des deux règles est construit comme suit :

$$\mu_{RoS}(Z) = \max[\mu_{R1}(Z), \mu_{R2}(Z)] \quad (IV.16)$$

2) Méthode d'inférence max-prod

C'est la méthode appliquée au contrôleur dite de type « Larsen », cette méthode est basée sur l'utilisation du produit pour l'implication, dans ce cas la $i^{\text{ème}}$ règle donne la décision [13]:

$$\mu_{Ri} = \alpha_i \cdot \mu_{ei}(Z)$$

$$\text{Avec : } \alpha_i = \mu_{RM}(\mu_{Ai}(x_0), \mu_{Bi}(y_0)) = \min(\mu_{Ai}(x_0), \mu_{Bi}(y_0))$$

La fonction d'appartenance résultante est donnée par :

$$\mu_{RoS}(Z) = \max[\mu_{R1}(Z), \mu_{R2}(Z)] \quad (\text{IV.17})$$

3) Méthode d'inférence som-prod

Cette méthode est appliquée au contrôleur dit de type « Zadeh ». Elle est définie comme suit [17] :

$$\mu_{Ri} = \alpha_i \cdot \mu_{ei}(Z)$$

$$\alpha_i = \mu_{Rp}(\mu_{Ai}(x_0), \mu_{Bi}(y_0)) = \mu_{Ai}(x_0) \cdot \mu_{Bi}(y_0)$$

$$\mu_{RoS}(Z) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mu_{Ri} \quad (\text{IV.18})$$

Avec : m nombre de règle.

IV.4.5. Stratégie de défuzzification

Pour bien définir la loi de commande, le contrôleur flou doit avoir une procédure de défuzzification jouant le rôle de la conversion de la commande floue en valeur physique pour chaque état du processus. Il existe plusieurs stratégies de défuzzification dont les plus utilisées sont [20]:

Méthode du maximum ;

Méthode de la moyenne des maximums ;

Méthode du centre de gravité ;

Méthode des hauteurs pondérées.

1) Méthode du maximum

Pour cette méthode, la commande est égale à la commande locale ayant la fonction d'appartenance maximale :

$$U = \text{MAX}_{Z \in s(\mu_{\text{RoS}}(Z))} \quad (\text{IV.19})$$

Ou S est le support de μ_{RoS}

Dans le cas général : U est indéterminé lorsqu'il existe plusieurs points qui maximisent $\mu_{\text{RoS}}(Z)$. Pour cette raison on fait appel à la méthode des maximums.

2) Méthode de la moyenne des maximums

Cette stratégie de défuzzification génère une commande qui représente la valeur moyenne de toutes les actions de contrôle ayant des fonctions d'appartenance maximales. Dans le cas d'un univers de discours discret, l'action de commande est exprimée par :

$$U = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^m Z_i \quad (\text{IV.20})$$

Ou : Z_i est la valeur de la commande avec laquelle la fonction d'appartenance associée atteint la valeur maximale $\mu_{\text{RoS}}(Z)$

L : est la nombre total des valeurs prises par la fonction d'appartenance.

3) Méthode du centre de gravité

C'est la méthode la plus utilisée qui consiste à déterminer le centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante $\mu_{\text{RoS}}(Z)$.

Dans ce contexte il suffit de calculer l'abscisse U du centre de gravité comme suit :

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i \cdot \mu_{\text{RoS}}(Z_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_{\text{RoS}}(Z_i)} \quad (\text{IV.21})$$

Ou n : est le nombre des niveaux de la sortie du contrôleur. Par cette méthode, en aboutit à une solution unique.

4) Méthode des hauteurs pondérées

Cette méthode consiste à calculer la sortie du contrôleur en utilisant les centres de gravité Z^* de chacun des ensembles C_i :

$$U = \frac{\sum_{i=1}^m Z_i^* \mu_{Ci}(Z_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_{Ci}(Z_i)} \quad (IV.22)$$

Où m : est le nombre d'ensembles flous associés à la variable de sortie U .

IV.4.6. Structure du régulateur par logique floue

Le régulateur à logique floue (RLF) possède en générale deux entrées, l'erreur « e » et la variation de l'erreur « Δe » pour un régime transitoire convenable et un bon réglage de la grandeur, on utilise un facteur d'échelle K_e et $K_{\Delta e}$, K_u . Le domaine normalisé coïncide avec la variation maximale du signal de commande U_{com} . Pour cela on choisit une forme triangulaire pour la fonction d'appartenance distribuée de manière équidistante avec chevauchement ce qui conduit à une caractéristique linéaire ou quasi-linéaire. La distribution des fonctions d'appartenance de la variable de sortie est choisie de façon à aboutir à une caractéristique non linéaire [14].

Le bloc RLF est l'organe principal du régulateur contenant l'interface de fuzzification qui représente l'univers de discours et les variables linguistiques, puis l'inférence qui fournit l'action (la décision) de la commande, et l'interface de défuzzification qui transforme la commande floue à une commande non floue pour contrôler notre système.

A la sortie du RLF, la variable X_r est multipliée par un facteur d'échelle K_u pour fournir la variable normalisée U de la commande.

La configuration interne d'un régulateur par logique floue est donnée par la figure (IV.9).

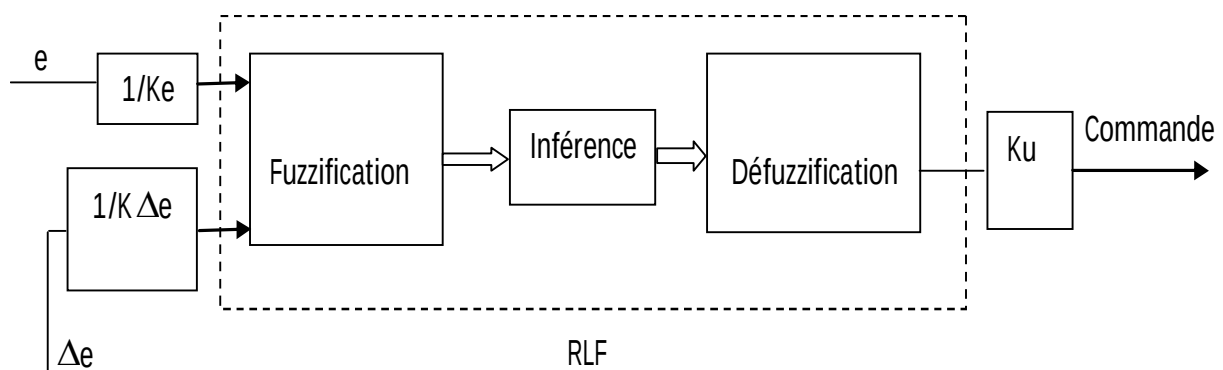


Figure (IV. 9) : Structure d'un régulateur à logique floue (RLF)

IV.5. Commande floue de la MSAP5PH alimentée en courant

Dans cette section, nous allons voir comment introduire cette théorie pour un réglage de vitesse de la machine synchrone à aimants permanents à cinq phases, et nous allons traiter tous les détails concernant : les fonctions d'appartenances et les règles floues.

La figure (IV.10) montre la structure de contrôle d'une machine synchrone à aimants permanents à cinq phases avec un contrôle flou.

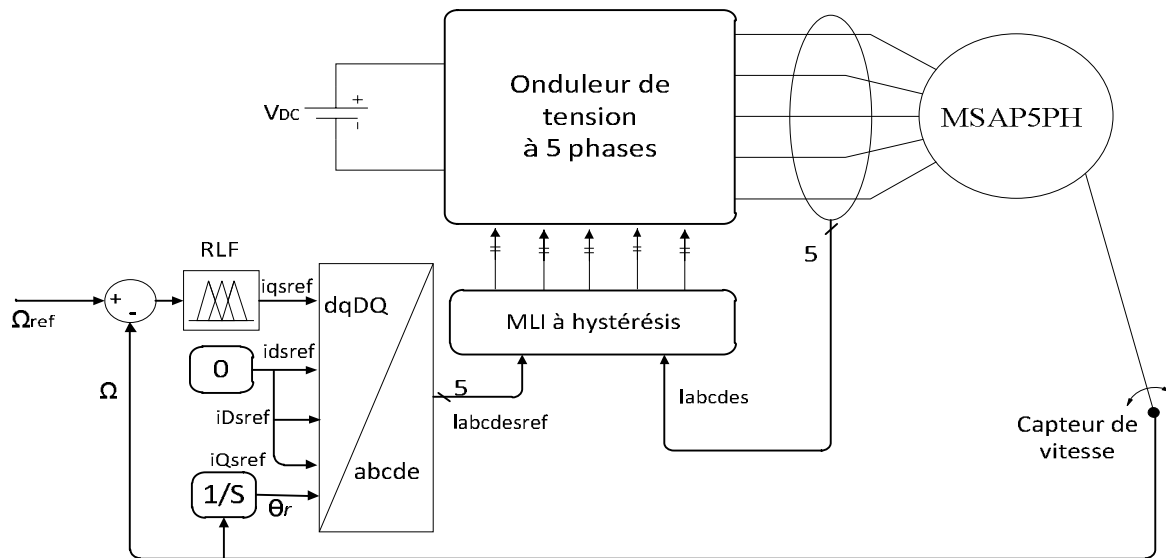


Figure (IV. 10) : Structure de la commande floue de la MSAP5PH alimentée en courant

La figure (IV.11) montre les fonctions d'appartenance en forme de triangle de l'erreur (e) et de changement d'erreur (Δe). Les ensembles flous sont désignés par les étiquettes : NG (grand négatif), NM (moyenne négative), NP (négative petit) , Z (zéro) , PP (petit positif) , PM (milieu positif) , et PG (positif grand) .

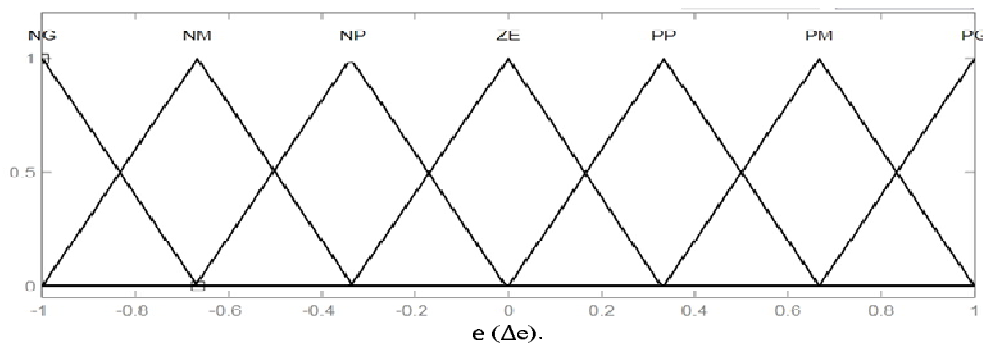


Figure (IV. 11) : Fonctions d'appartenance triangulaires pour les variables d'entrée e et Δe

La figure(IV.12)montre les fonctions d'appartenance proposées pour la variable de sortie. Les règles de contrôle sont résumées dans le tableau (IV. 1). La stratégie d'inférence adoptée est

basée sur algorithme de Mamdani, et la méthode du centre gravité est utilisée en tant que stratégie de défuzzification.

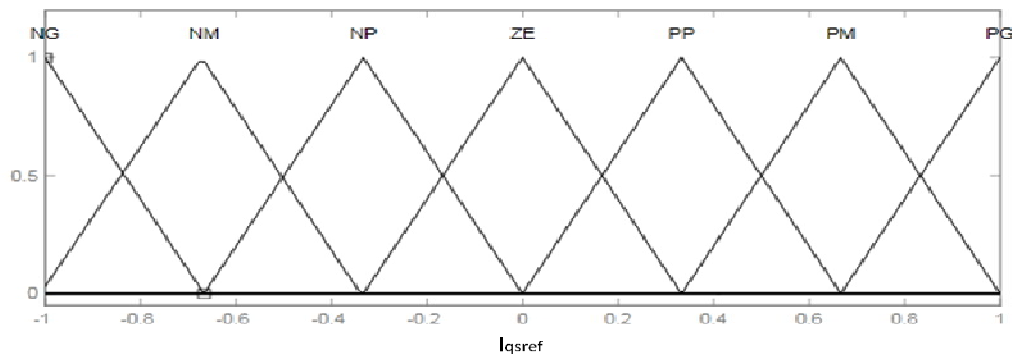


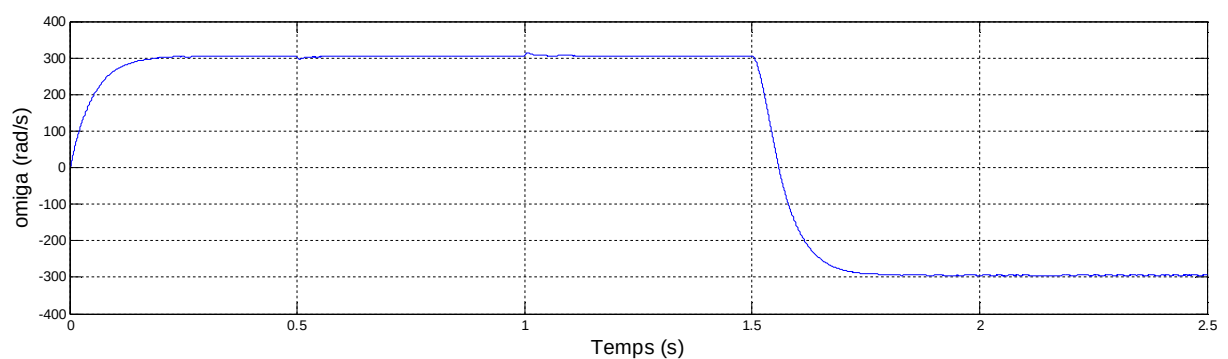
Figure (IV. 12) : Fonctions d'appartenance triangulaires pour la variable de sortie i_{qref}

Tableau (IV. 1) : Base d'inférence

Δe	PG	PM	PP	Z	NP	NM	NG
PG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	Z
PM	NG	NG	NG	NM	NP	Z	PP
PP	NG	NG	NM	NP	Z	PP	PM
Z	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
NP	NM	NP	Z	PP	PM	PG	PG
NM	NP	Z	PP	PM	PG	PG	PG
NG	Z	PP	PM	PG	PG	PG	PG

IV.5.1. Résultats de simulation

La commande floue de la MSAP5PH est vérifiée par simulation en utilisant les gains suivants : gain de l'erreur=0.0005, gain de variation de l'erreur=0.3, gain de variation de la commande =4, limitation du couple [-15 15](Nm).



a) Vitesse de rotation

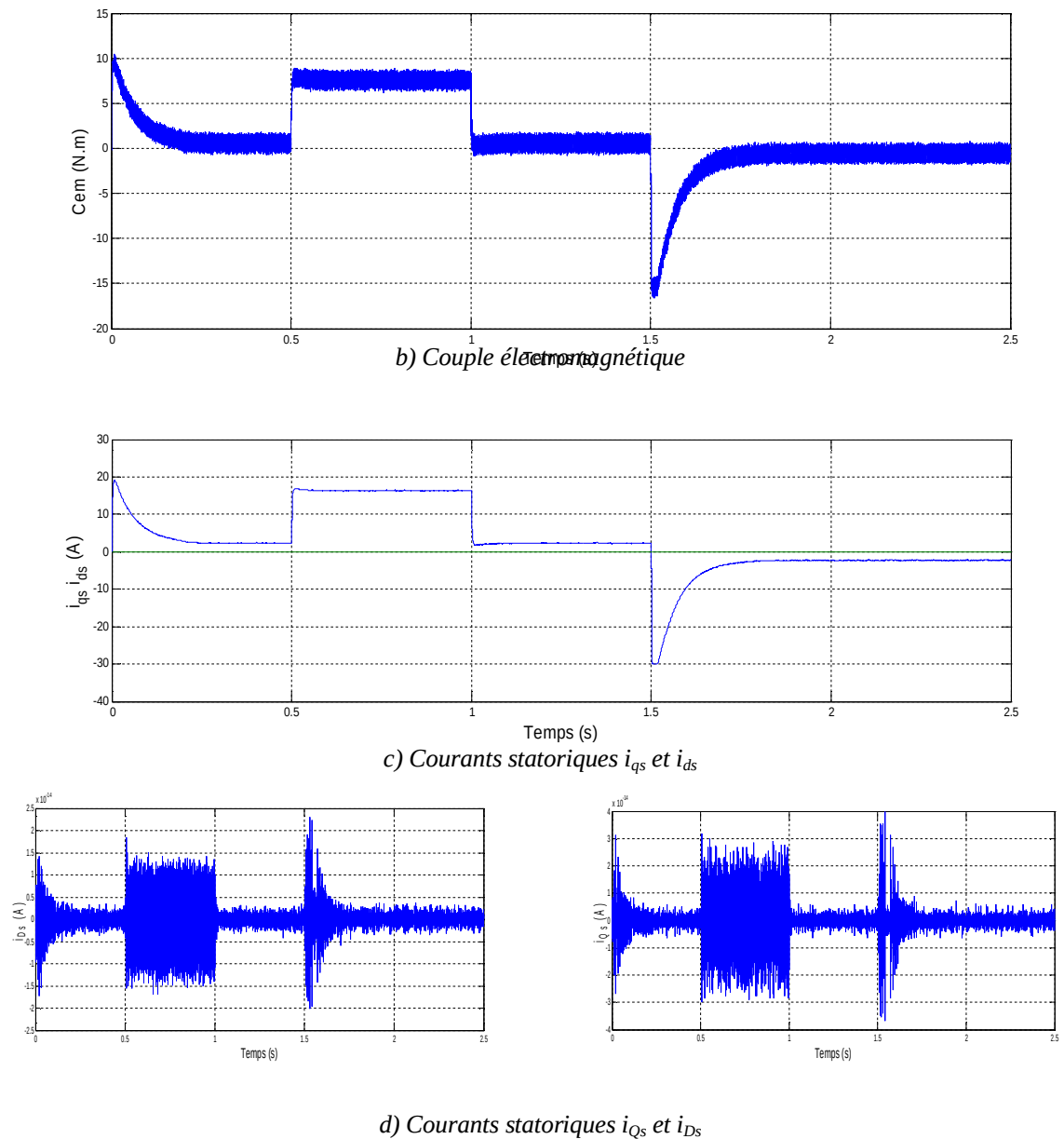


Figure (IV. 13) : Résultats de simulation de la commande floue de la MSAP5PH alimentée en courant

La figure (IV.13), illustre l'évolution de la vitesse de rotation, du couple électromagnétique, et les courants en quadrature i_{qs} , direct i_{ds} , i_{Ds} et i_{Qs} . La figure présente d'abord, un démarrage avec application d'une charge entre (0.5 et 1) s, suivie d'une inversion de la vitesse de référence à $t=1.5$ s de 300 rad/s à -300 rad/s.

La figure (IV.4-a) donne la réponse en vitesse de la machine où l'application du couple de charge est sans effet ; ce qui prouve l'efficacité du régulateur flou utilisé.

La figure (IV.13-b) montre que, le couple électromagnétique répond instantanément à la perturbation. De même pour le courant i_{qs} , par contre le courant i_{ds} est maintenu nul, comme le montre la figure (IV.12-c), confirmant ainsi la nature découplé de cette commande.

Lors de l'inversion de la vitesse à couple résistant nul, on constate que cette inversion de vitesse est rapide sans dépassement.

IV.6. Commande floue de la MSAP5PH alimentée en tension

La figure (IV.14) présente la structure de commande par logique floue de la machine synchrone à aimants permanents à cinq phases.

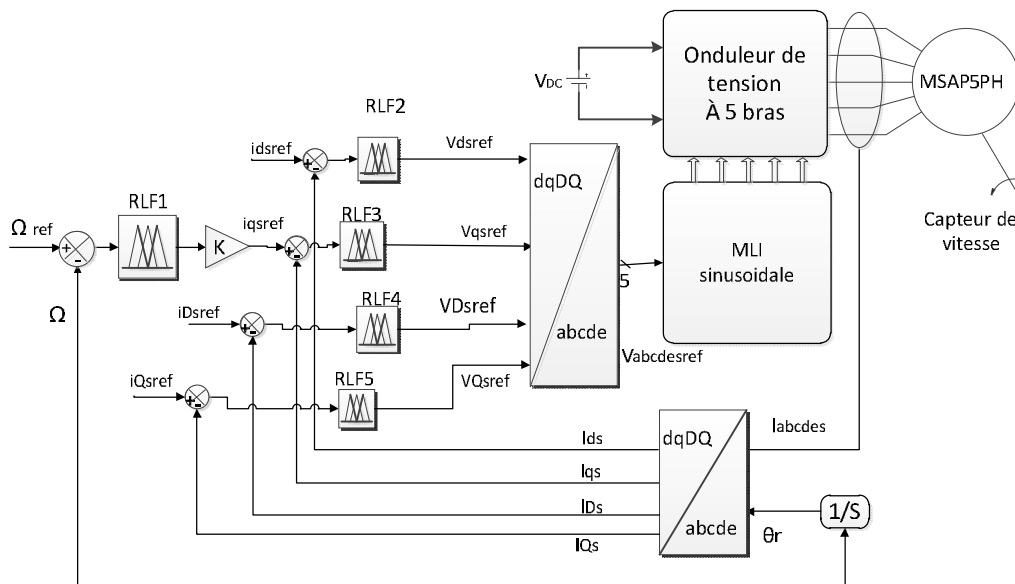


Figure (IV. 14) : Structure de la commande floue de la MSAP5PH alimentée en tension

Tous les régulateurs flous sont de même forme que le régulateur utilisé dans la section précédente.

IV.4.7. Résultats de simulation

La commande floue de la MSAP5PH est vérifiée par simulation en utilisant les gains suivants :

RLF1: gain de l'erreur=0.0005, gain de variation de l'erreur=0.3, gain de variation de la commande =4.

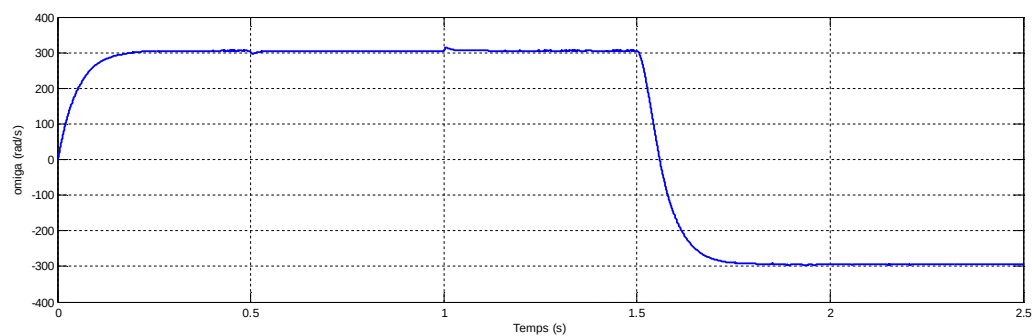
RLF2: gain de l'erreur=0.0005, gain de variation de l'erreur=0.5, gain de variation de la commande =6.

RLF3: gain de l'erreur=0.005, gain de variation de l'erreur=0.5, gain de variation de la commande =6.

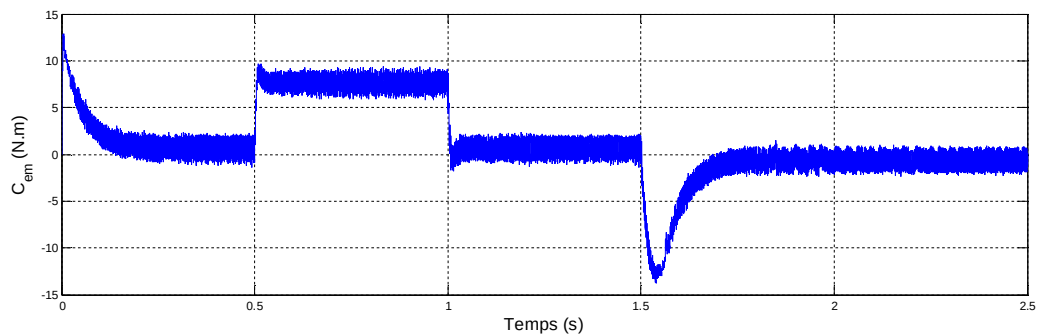
RLF4: gain de l'erreur=0.005, gain de variation de l'erreur=0.5, gain de variation de la commande =6.

RLF5: gain de l'erreur=0.005, gain de variation de l'erreur=0.5, gain de variation de la commande =6.

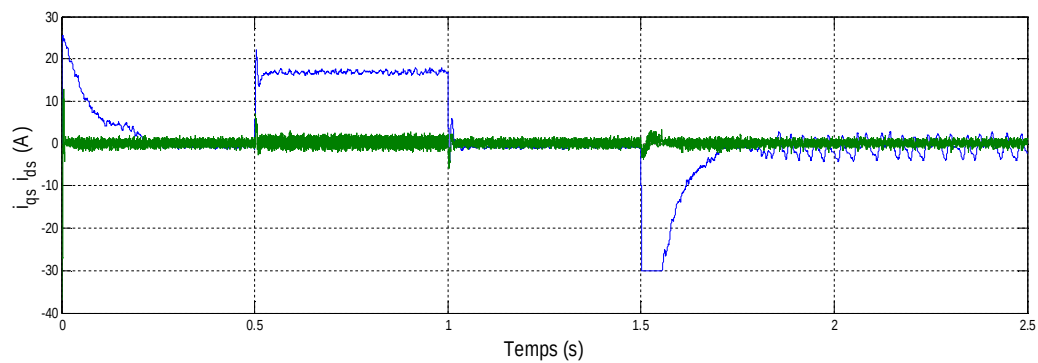
La figure (IV.15) regroupe l'ensemble des résultats de simulation de la commande floue de la machine synchrone à aimants permanent à cinq phases.



a) Vitesse de rotation



b) Couple électromagnétique



c) Courants statoriques i_{qs} et i_{ds}

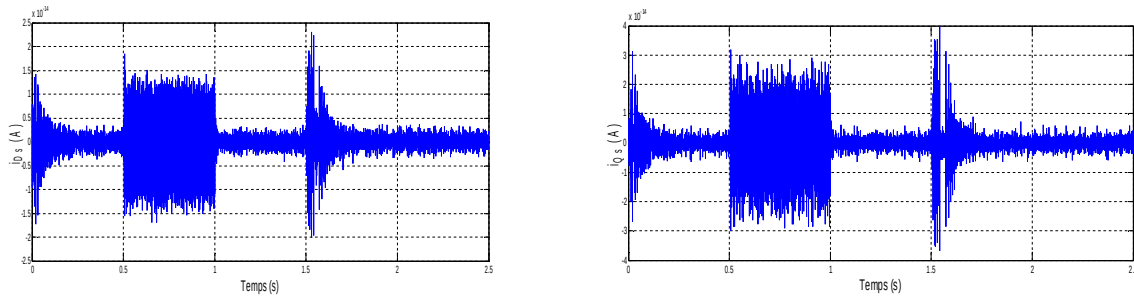
d) Courants statoriques i_{Qs} et i_{Ds}

Figure (IV. 115): Résultats de simulation de la commande floue de la MSAP5PH alimentée en tension

La figure (IV.15-a) présente un démarrage pour une consigne de vitesse de 300 rad/s. on constate que la vitesse atteint la vitesse de référence au bout d'un temps de (0.2s) et se stabilisé à cette valeur. Lors de l'application d'une charge entre (0.5 ,1)s, on note que la vitesse est maintenue à sa valeur de référence surmontant ainsi le couple de charge appliqué. Au moment de l'inversion de la vitesse de 300 rad/s à -300rad/s à couple résistant nul, on constate que cette inversion de vitesse est rapide. En outre, le découplage de la machine est réalisé avec succès comme le prouve l'allure du courant direct donnée par la figure (IV.15-c).

Le graphe de la figure (IV.15-b) représente l'évolution du couple électromagnétique qui répond instantanément à la perturbation.

Comparé au PI le régulateur flou déminé le temps de réponse de vitesse et réduit aussi l'effet de la perturbation à l'instant d'application de la charge

IV.7. Conclusion

La commande floue est une théorie très puissante qui permet de contrôler les systèmes en présence des informations vagues, incomplètes et imprécises. Elle est très utile là où le modèle du système est inconnu ou difficile à formuler.

On peut conclure que la commande par logique floue associée à la commande vectorielle se prête bien pour le réglage de la vitesse et de la machine synchrone à aimants permanents à cinq phases. Bien que cette dernière présente un modèle non linéaire assez complexe et fortement couplé, la commande floue assure des performances satisfaisantes à la fois en régimes transitoire et permanent.