

## La commande à base de la logique floue

### 1. Introduction

Les méthodes conventionnelles de réglage sont basées sur une modélisation adéquate du système à régler et un traitement analytique à l'aide de la fonction de transfert ou d'équations d'état. Malheureusement, celles-ci ne sont pas toujours disponibles.

Ces techniques de commande ont prouvé leur efficacité dans de nombreux problèmes de régulation industrielle. Les méthodes de commande avancées (Régulateur adaptatif, Commande prédictive, Commande robuste...) permettent de répondre aux exigences d'un certain nombre de systèmes fortement non linéaires. C'est dans ce même créneau que les méthodes de modélisation et de commande floues se positionnent [12].

La majorité des systèmes industriels complexes sont difficiles à contrôler automatiquement. Cette difficulté provient de :

- leur non-linéarité,
- la variation de leurs paramètres,
- la qualité des variables mesurables.

Ces difficultés ont conduit à l'avènement et au développement de nouvelles techniques telles que la commande floue particulièrement intéressante lorsqu'on ne dispose pas de modèle mathématique précis du processus à commander ou lorsque ce dernier présente de fortes non linéarités ou imprécisions [13].

Dans plusieurs applications, les résultats obtenus avec un contrôleur flou sont meilleurs que ceux obtenus avec un algorithme de contrôle conventionnel. En particulier, la méthodologie du contrôle flou apparaît utile quand les processus sont très complexes à analyser par les techniques conventionnelles. Plusieurs travaux dans le domaine de commande ont montré qu'un régulateur par logique floue est plus robuste qu'un régulateur conventionnel.

Nous présentons dans ce chapitre les concepts de la logique floue et nous décrivons les aspects méthodologiques nécessaires à la compréhension de cette technique en donnant des

rappels sur les bases générales de la logique floue et les différents types de la commande en utilisant la logique floue.

## 2. La logique floue

La logique floue suscite actuellement un fervent intérêt de la part des chercheurs, des ingénieurs et des industriels, mais plus généralement de la part de tous ceux qui éprouvent le besoin de formaliser des méthodes empiriques, de généraliser les modes de raisonnement naturels, d'automatiser la prise de décision dans leur domaine et de construire des systèmes artificiels capables d'effectuer les tâches habituellement prises en charge par les humains.

Les démarches fondamentales de l'activité industrielle et économique, telles que la conception des produits, la gestion des systèmes ou la prise de décision, posent des problèmes de complexité croissante. Face à cette difficulté, les approches numériques, pourtant bien développées se sont avérées d'une efficacité limitée. Zadeh a fait le lien entre les ensembles flous et la modélisation non probabiliste de l'incertitude grâce à la théorie des possibilités, dans laquelle les fonctions d'appartenance des ensembles flous servent à représenter les idées de valeur incomplètement spécifiée et mal connue. Les ensembles flous et la théorie des possibilités sont à la base d'une méthodologie de représentation et d'utilisation de connaissances imprécises, vagues et incertaines que Zadeh appelle «théorie du raisonnement approché» et qui est plus connue sous le vocable de «logique floue» [13].

Les travaux de Lotfi Zadeh dans les années soixante sur la théorie des ensembles flous et la logique floue, à l'université de Berkeley ont jeté les bases de la commande floue actuelle. Ces travaux ont mis un certain temps avant d'être acceptés par la communauté de l'automatique et l'industrie. En effet la logique floue, de part ses aptitudes pluridisciplinaires (utilisée dans des domaines aussi variés que la gestion de base de données, les systèmes experts, le traitement du signal, la classification de données, la commande de systèmes automatiques), s'est attirée les critiques des scientifiques qui se sentaient attaqués sur leurs positions [12], il fallait attendre les années quatre-vingts dix pour que ces nouvelles théories soit acceptées et utilisées d'une manière générale.

En revanche, dans le domaine de la commande, la première application de la logique floue a été réalisée par Mamdani en 1974. Depuis 1987, date la première application utilisant la logique floue, le métro de Sendai, l'utilisation des techniques de commande floue n'a cessé de s'accroître [12].

### 3. Les différentes parties de la commande floue

Un contrôleur flou est un système à base de connaissances particulier, utilisant un raisonnement en profondeur limité, dans une procédure de chaînage avant règles (activation des règles par les prémisses).

On peut distinguer plusieurs étapes dans le traitement des règles. Un schéma représentatif peut être le suivant :

Les variables caractéristiques du système à commander et les consignes définissent les variables d'entrée du contrôleur flou. Les variables caractéristiques sont en général, les grandeurs de sortie du processus et, le cas échéant, d'autres mesures déterminantes pour saisir l'évolution dynamique du processus. Les variables de sortie du contrôleur flou sont les commandes à appliquer au processus.

La base de connaissances est composée d'une base de données et d'une base de règles.

La base de données regroupe :

- Les ensembles flous associés aux variables d'entrée et de sortie du contrôleur flou,
- Les facteurs d'échelle (gains) en entrée (normalisation) et en sortie (dénormalisation).

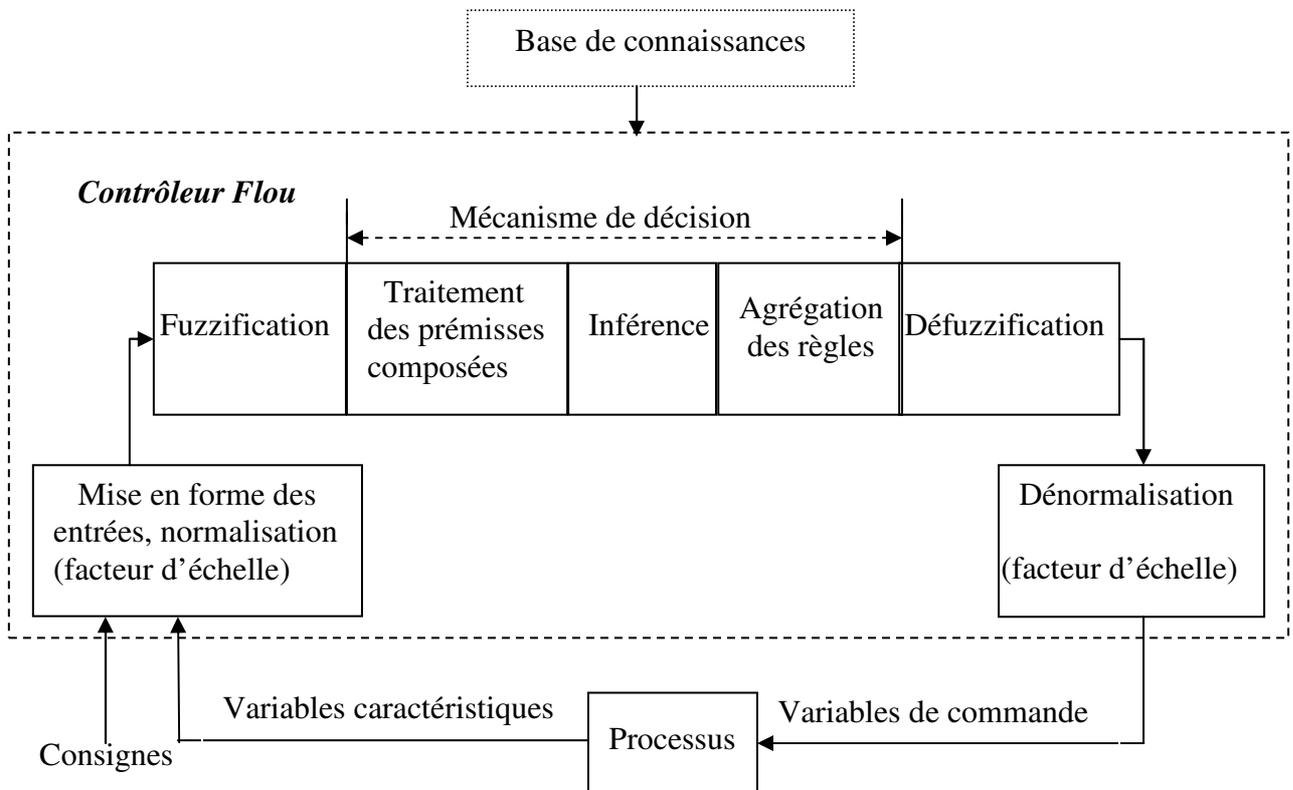


Figure II.1. Structure de base d'un contrôleur flou

La base de règle contient des règles de la forme :

$$\ll \text{Si } X_1 \text{ est } A_1 \text{ et } X_2 \text{ est } A_2 \dots \text{et } X_n \text{ est } A_n \text{ Alors } Y \text{ est } B \gg \quad (\text{II.1})$$

Ou  $X_1, X_2, \dots, X_n$  et  $Y$  sont des grandeurs physiques caractéristiques du système et du problème de commande.  $A_1, A_2, \dots, A_n$  et  $B$  sont des labels linguistiques.

Suivant la nature de  $B$  on parlera de :

- Règles à conclusion symbolique (contrôleur de type Mamdani) :  $B$  est une valeur linguistique. Exemple :  
*Si l'erreur est « Négatif Moyen » et la variation de l'erreur est « Positif Petit » Alors la commande est « Négatif Petit ».*
- Règles à conclusion algébrique (contrôleur de Sugeno) :  $B$  est une valeur numérique (singleton) ou une équation mathématique bien précise (non floue). Exemple :  
*Si l'erreur est « Négatif Moyen » et la variation de l'erreur est « Positif Petit » Alors la commande est -0.3.* Lorsque  $B$  est une valeur numérique on parle de règles de Takagi-Sugeno « d'ordre zéro », sinon, de règles à conclusion polynomiale.

Bien que les sorties des contrôleurs flous de type Takagi-Sugeno soient généralement des fonctions non linéaires statiques de leurs entrées, il ne faut pas oublier de mentionner les contrôleurs dits « flous dynamiques » de Takagi-Sugeno, où  $B$  est un modèle dynamique, certain ou incertain, à temps continu ou discret. L'utilisation de tels contrôleurs permet d'étendre certains résultats de l'automatique classique à la commande floue.

On distingue classiquement trois parties dans la structure d'un contrôleur flou : la fuzzification, le mécanisme de décision et la défuzzification.

- La fuzzification est l'étape qui permet de transformer une grandeur mesurée sur le processus en un ensemble flou.
- Le mécanisme de décision permet de calculer les ensembles flous associés à la commande.
- La défuzzification est l'étape qui permet de transformer l'ensemble flou, obtenu par le calcul précédent, en une grandeur de commande à appliquer au processus.

Les opérations de normalisation et de dénormalisation sont des étapes optionnelles.

### 3.1. Mise en forme des entrées, normalisation

Cette première étape permet le traitement des variables d'entrée du contrôleur flou, par exemple, calcul de l'erreur et des variations d'erreurs. L'utilisation de domaines normalisés

(univers de discours compris entre -1 et 1) nécessite une transformation d'échelle transformant les grandeurs physiques des entrées en des valeurs normalisées appartenant à l'intervalle [-1,1].

### 3.2. Fuzzification

C'est l'opération de *projection* des variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables.

Le choix de la forme des fonctions d'appartenance (triangulaires, trapézoïdales, exponentielles, gaussiennes,...) est arbitraire. Les formes triangulaires facilitent la programmation ce qui explique qu'elles soient le plus fréquemment utilisées. Quant au nombre de fonctions d'appartenance, il est généralement impair car elles se répartissent autour de zéro.

### 3.3. Traitement des prémisses composées

En général, les prémisses des règles vont comporter plusieurs clauses liées par des connecteurs « ET », « OU » et « NON ». Dans la pratique, pour les opérations de conjonction et de disjonction, on a souvent recours, parmi les normes et conormes triangulaires, aux opérateurs *min* et *max*. Quant à la négation  $A^c$  d'un ensemble flou  $A$ , elle est caractérisée par :

$$\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{II.2})$$

### 3.4. Inférence floue

Elle repose sur l'utilisation d'un opérateur d'implication permettant d'évaluer le degré de vérité d'une règle  $R$  de la forme « **Si**  $X$  est  $A$  et  $X_2$  **Alors**  $Y$  est  $B$  ».

En d'autres termes, cet opérateur quantifie la force de la liaison entre la prémisse et la conclusion de la règle.

Les opérateurs les plus courants en commande sont de type conjonctif :

- L'implication de Mamdani (1974) :

$$\mu_R(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{II.3})$$

- L'implication de Larsen (1980) :

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (\text{II.4})$$

### 3.5. Agrégation des règles

Selon le type de l'implication, classique ou conjonctive, l'opérateur utilisé pour agréger les règles est de type conjonctif ou disjonctif. Ainsi, en commande, l'implication étant généralement de type conjonctif, cela revient à considérer que les règles sont liées par un opérateur OU. En pratique, on utilise l'opérateur *max* :

$$\mu_{B'}(y) = \max_{i=1, \dots, N} (\mu_{B_i}(y)) \quad (\text{II.5})$$

### 3.6. Défuzzification

La défuzzification consiste à transformer l'ensemble flou résultant de l'agrégation des règles en une grandeur de commande précise. Là aussi il existe plusieurs méthodes [14], parmi lesquelles :

- La méthode de la hauteur,
- Le premier des maximas,
- Le dernier des maximas,
- La moyenne des maximas,
- Le centre de gravité,
- Le centre des aires,
- Le centre de la plus grande surface,
- Le centre des maximas.

les méthodes de défuzzification les plus utilisées en commande floue sont le centre de gravité, le centre des aires et le centre des maximas.

### 3.7. Dénormalisation

Cette dernière étape transforme les valeurs normalisées des variables de commande en des valeurs appartenant à leur domaine physique respectif.

## 4. Les différents types de la commande à base de la logique floue

En se basant sur les différentes règles de commande floue et de leurs méthodes de génération, les approches de commande en utilisant la logique floue peuvent être classées dans les catégories suivantes :

### 4.1. La commande floue de type Mamdani

Dans un système flou de Mamdani (Conventionnel) les règles sont de type :

$$R_{(i,j,k)} : \text{Si } x \text{ est } A_i \text{ et } y \text{ est } B_j \text{ Alors } z \text{ est } C_k \quad (\text{II.6})$$

Où  $A_i, B_j$  et  $C_k$  représentent des termes linguistiques auxquels est attribuée une signification floue que l'on suppose normalisée.

Pour des entrées numériques précises,  $x_0$  et  $y_0$ , un sous-ensemble flou de sortie, noté  $F$ , est généré selon la relation :

$$\mu_F(z) = \max_{(i,j,k) \in I} \min(\mu_{A_i}(x_0), \mu_{B_j}(y_0), \mu_{C_k}(z)) \quad (\text{II.7})$$

$\mu$  est appelée fonction d'appartenance.

L'opération  $\max_{(i,j,k) \in I}$  correspond à l'application de l'opérateur  $\max$  sur l'ensemble des règles actives. La valeur numérique de sortie délivrée par le système flou est obtenue par défuzzification, classiquement implantée par la méthode du centre de gravité :

$$z = \frac{\int z \mu_F(z) dz}{\int \mu_F(z) dz} \quad (\text{II.8})$$

Dans ce type de systèmes flous, la prémisse et la conclusion sont floues. Après l'inférence, le résultat est un ensemble flou caractérisé par sa fonction d'appartenance. Afin d'obtenir la valeur réelle de la commande à appliquer il faut passer par une étape de « défuzzification »

Les règles de la commande floue « Si-Alors » sont obtenues à partir de l'expertise d'un opérateur. Quoique la performance d'une telle technique de commande soit généralement satisfaisante en pratique la non garantie de la stabilité du système de commande en boucle fermée est souvent critiquée.

Plusieurs approches ont été proposées pour étudier le problème de stabilité. L'idée principale de ces approches est de considérer le contrôleur flou comme un contrôleur non-linéaire et d'utiliser la théorie des systèmes non linéaire pour l'analyse de la stabilité [15].

### 4.2. La commande floue du type PI ou PID

La principale difficulté des régulateurs PID réside dans le réglage des gains afin d'obtenir de bonnes performances surtout lorsque le procédé à commander est d'ordre élevé et à dynamique non linéaire. En effet, le problème dans le réglage des gains devient plus difficile en présence de variations paramétriques et de perturbations externes.

La nature complexe des procédés industriels et la nécessité de maintenir de bonnes performances exigent un réglage en ligne des gains du régulateur PID ou PI. Cette opération peut être réalisée par des régulateurs numériques autos ajustables. Dans ce cas, l'ajustement en ligne des paramètres de synthèse est, généralement, basé sur un algorithme de réglage qui fait appel, à chaque période, à la fonction de transfert du procédé, souvent difficile à déterminer avec une précision suffisante. Ceci rend ce principe de contrôle assez sensible aux variations du comportement de procédé industriel. Dans l'objectif de maintenir de bonnes performances face à d'éventuelles variations de la dynamique du procédé, il est évident que le réglage ne peut se faire aisément qu'avec la mesure de l'écart entre les performances réelles et désirées. L'exploitation d'une supervision basée sur la logique floue en vue de l'adaptation des paramètres de synthèse d'un régulateur du type PID ou PI permet d'offrir une alternative très intéressante pour ramener, quelle que soit la situation en ligne, les performances réelles à celles souhaitées [16].

Il est possible d'améliorer les performances du système de commande par la combinaison de la logique floue avec un régulateur PID ou PI ce se qui s'appelle un contrôleur PID ou PI flou.

### **4.3. La commande neuro-floue**

La commande neuronale et la commande floue sont deux techniques de la commande intelligente les plus populaires. Elles possèdent plusieurs similarités, par exemple, les systèmes flous et les réseaux de neurones ont le même objectif, tous les deux tentent de modéliser le fonctionnement du cerveau humain. Les réseaux de neurones tentent de modéliser l'architecture du cerveau en créant une modélisation de l'entité du cerveau : le neurone. Les systèmes flous eux modélisent le cerveau par son mode de fonctionnement (apprentissage et déduction).

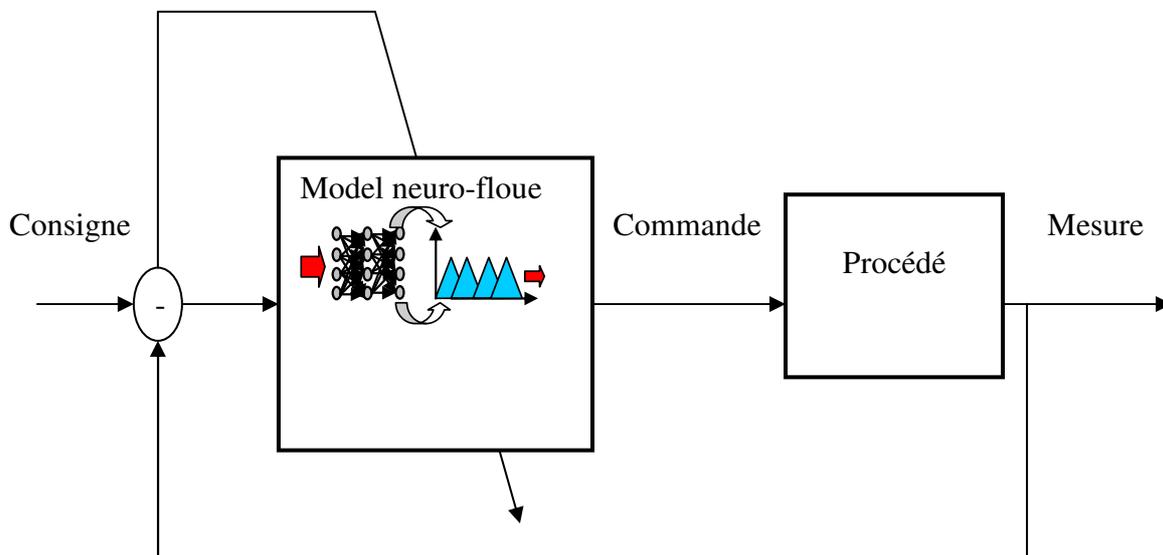
Dans les deux cas le principe est de stocker la connaissance et l'employer pour prendre des décisions (lois) de commande, et la combinaison de ces deux techniques appelée commande neuro-floue est fondamentalement une commande floue augmentée par les réseaux de neurone et permet d'améliorer les caractéristiques comme la flexibilité, la possibilité de traitement de données et l'adaptabilité.

Le processus du raisonnement flou est réalisé par les réseaux neurones dont les poids correspondent aux paramètres du raisonnement flou. En utilisant la méthode de rétropropagation ou n'importe quel algorithme d'apprentissage de réseaux de neurone, un

système de commande neuro-floue peut identifier les règles de commande et apprendre les fonctions d'appartenances floues [17].

Il convient de noter que le modèle flou de type Takagi–Sugeno est l'un des systèmes flous les plus employés pour réaliser la commande neuro-floue.

Un des avantages principaux de la commande neuro-floue est qu'elle n'exige pas des informations sur le modèle mathématique du système à commander. Cette classe de commande floue offre une nouvelle voie dans la résolution de plusieurs problèmes de commande où le modèle mathématique du système pourrait être non disponible. Cependant, une de ses limitations principales est l'analyse systématique de la stabilité des systèmes de commande en boucle fermée et la convergence des algorithmes d'adaptation.



**Figure II.2** Structure générale d'une commande neuro-floue

#### 4.4. La commande par mode glissant flou

La commande par mode glissant a connu un grand succès ces dernières années, cela est dû à sa simplicité de mise en œuvre et à sa robustesse vis-à-vis des incertitudes du système et des perturbations externes entachant le processus. Elle consiste à définir une surface dite de glissement, la poursuite de la trajectoire désirée se fait en deux phases : l'approche et le glissement. Ainsi, la commande utilisée dans ce cas se compose de deux parties : la première permettant l'approche jusqu'à l'arrivée à la surface, et la deuxième permet le maintien et le glissement le long de cette surface [18].

Bien qu'un contrôleur flou s'avère semblable à un contrôleur par mode glissant modifié, l'idée principale de la commande par mode glissant flou est de combiner ou intégrer la commande floue et la commande par mode glissant de manière à exploiter les avantages des deux techniques. Le principe de base est d'équiper un contrôleur par mode glissant par des possibilités de manipuler l'information qualitative par une linguistique floue. L'avantage direct d'une telle commande est que la logique floue peut éliminer l'effet du broutement par la construction des couches à frontière floues qui remplacent les surfaces de commutation du mode glissant. Une autre approche consiste à concevoir des systèmes de commande flous et d'ajouter un contrôleur par mode glissant pour garantir la stabilité et améliorer la robustesse du système en boucle fermée.

L'avantage important de la commande par mode glissant flou est que le problème d'analyse et de stabilité des systèmes en boucle fermée peut être abordé dans le cadre de la commande par mode glissant, et les techniques développées pour la commande par mode glissant peuvent être appliquées.

On peut dire aussi que l'objectif de la synthèse d'une loi de commande par mode glissant est la compensation de l'erreur d'approximation floue entre le système non linéaire et le système flou supposé disponible [19].

#### **4.5. La commande floue adaptative**

La commande adaptative est basée sur l'utilisation d'un mécanisme d'adaptation pour la commande des systèmes partiellement connus. La commande adaptative des systèmes linéaires et certaines classes spéciales des systèmes non linéaires a été bien développée depuis les années 70. Alors que la commande adaptative des systèmes non linéaires présente toujours un défi à la communauté de commande. Les modèles mathématiques ne pourraient pas être disponibles pour beaucoup des systèmes complexes en pratique, et le problème de la commande adaptative de ces systèmes est loin d'être résolu d'une manière satisfaisante.

Des systèmes flous basés sur les fonctions floues de base sont employés pour représenter les fonctions non linéaires inconnues des systèmes qui possèdent des variations intrinsèques inconnues. L'objectif est de conserver une bonne performance du système complet en adaptant le régulateur en fonction des variations du système. Les paramètres des systèmes flous tels que les fonctions d'appartenance caractérisées par des limites linguistiques sont mises à jour selon des lois d'adaptation.

L'idée principale de la commande floue adaptative est d'employer les systèmes flous pour rapprocher les comportements non linéaires inconnus des systèmes non linéaires et d'appliquer les techniques bien développées de la commande adaptative. Les régulateurs flous adaptatifs peuvent être divisés en deux classes :

- Les régulateurs adaptatifs directs: les paramètres des régulateurs sont modifiés en ligne afin de minimiser l'erreur entre le modèle de référence et le système réel.
- Les régulateurs adaptatifs indirects: les paramètres du système réel sont estimés et le régulateur est choisi en supposant que les valeurs estimées du modèle sont les vraies valeurs du système réel. Si le modèle du procédé réel utilise un système à base de logique floue on parle alors de régulateur flou adaptatif indirect.

La commande floue adaptative se compose donc d'un régulateur flou adaptatif. La différence principale entre un régulateur flou adaptatif et un régulateur adaptatif conventionnel est que le premier peut utiliser des données linguistiques. Ce qui est très important lorsque le système possède des incertitudes qu'un opérateur humain a appris à anticiper. Cependant, des approches robustes doivent être adoptées pour la commande floue adaptative à cause des erreurs inhérentes d'approximation des systèmes flous approchant les fonctions non linéaires originales [5] [6].

#### 4.6. La commande floue de type T-S

Les contrôleurs flous de Takagi–Sugeno sont, comme ceux de Mamdani, construits à partir d'une base de règles “**Si ... Alors ...**”. Les prémisses sont toujours exprimées linguistiquement et donc similaires à celles utilisées dans un contrôleur flou de Mamdani alors que les conclusions sont de nature numérique.

Un système flou de type Takagi-Sugeno (T-S) utilise des règles écrites de la manière suivante :

$$R_{(i,j,k)} : \mathbf{Si} \ x \text{ est } A_i \text{ et } y \text{ est } B_j \ \mathbf{Alors} \ z = f_k(x) \quad (\text{II.9})$$

Où  $f_k$  représente une fonction réelle quelconque.

Les fonctions de sortie  $f_k$ , peuvent être en principe des fonctions arbitraires des entrées, mais d'une manière générale elles sont choisies telles qu'elles soient une combinaison linéaire des entrées.

La particularité d'un modèle T-S est que la logique floue est seulement utilisée dans la partie prémisses des règles. La partie conclusion est décrite par des valeurs numériques.

Pour les valeurs d'entrée précises  $x_0$  et  $y_0$ , la sortie  $z$  est évaluée selon le mécanisme suivant [15]:

$$z = \frac{\sum_{(i,j,k) \in I} w_{i,j} f_k(x_0, y_0)}{\sum_{(i,j,k) \in I} w_{i,j}} \quad \text{Avec} \quad w_{i,j} = \mu_{A_i}(x_0) \cdot \mu_{B_j}(y_0) \quad (\text{II.10})$$

Ce type de modèle est aussi très intéressant pour la représentation de systèmes non linéaires tels que les systèmes mécaniques ou chaotiques.

## 5. Réglage, stabilité et robustesse d'un contrôleur flou

### 5.1. Réglage

Un contrôleur flou possède de nombreux paramètres de réglage, ce qui peut, à priori, effrayer ses utilisateurs potentiels. En effet, contrairement aux contrôleurs classiques, le contrôleur flou possède un nombre plus conséquent de paramètres, et offre, un nombre de degrés de liberté plus élevé.

On peut distinguer parmi les choix et les réglages à faire :

- L'expression des règles,
- La définition des variables et des valeurs linguistiques, avec leurs fonctions d'appartenance associées,
- La méthode d'implication,
- La méthode d'inférence,
- La méthode de défuzzification,
- Les facteurs d'échelle sur les entrées et les sorties du contrôleur.

Cependant, on constate une certaine insensibilité du résultat au choix des méthodes d'implication, d'inférence et de défuzzification. Pour les autres paramètres, un réglage séquentiel est possible :

- Fonctions d'appartenance,
- Règles.

Le réglage par essais successifs de ces nombreux paramètres étant assez long et fastidieux, diverses techniques d'autoréglage, d'optimisation et d'apprentissage ont été développées ces dernières années. On peut citer, à titre d'exemple, les techniques de la programmation mathématique, les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques.

## 5.2. Stabilité

L'analyse de la stabilité est à priori difficile dans une approche de type « *système à base de connaissances* » dont l'objectif est d'éviter l'utilisation de modèle mathématique du procédé. Une modélisation floue du système bouclé est alors nécessaire pour l'analyse de la stabilité. Toutefois, si une caractérisation mathématique du processus à commander existe, le contrôleur flou étant, en général, un contrôleur non linéaire, certains résultats de la théorie des systèmes non linéaires peuvent être utilisés. On distingue alors deux grandes familles d'approches :

- *La méthode directe de Lyapunov* : cette méthode permet d'affirmer la stabilité asymptotique d'un état d'équilibre si une fonction de Lyapunov  $V(x,t)$  définie positive dont la dérivée  $\frac{dV(x,t)}{dt}$  est définie négative existe.
- *L'approche entrée sortie* : cette approche permet d'affirmer la stabilité d'un système si la sortie de celui-ci, en réponse à une entrée bornée, est elle-même bornée.

Nous choisissons ici de distinguer les différentes méthodes d'analyse de la stabilité selon que l'on dispose du modèle mathématique du processus ou non. La liste des méthodes citées ici est non exhaustive [20].

### Non disponibilité d'un modèle mathématique du processus

Dans ce cas, le système en boucle fermée est modélisé par un système flou.

Les méthodes d'analyse de la stabilité dépendent alors du type du modèle.

- Si le modèle du système en boucle fermée est un modèle symbolique (de type Mamdani ou modèle aux relations floues) à temps discret, la stabilité n'est pas étudiée au sens classique du terme et de nouvelles définitions de la stabilité sont introduites. On parle alors de la stabilité d'un symbole flou.
- Dans le cas où le système en boucle fermée est modélisé par un système flou de type Takgi-Sugeno, des propriétés de stabilité asymptotique peuvent être démontrées à partir de l'utilisation de fonctions de Lyapunov quadratiques.
- Dans le cas où le modèle du système en boucle fermée est un modèle hybride [20] on utilise également des fonctions de Lyapunov quadratiques pour étudier la stabilité. Les modèles linguistiques et modèles de Takgi-Sugeno sont deux cas particuliers de modèles hybrides.

### Disponibilité d'un modèle mathématique du processus

Dans ce cas, on peut faire appel à diverses méthodes d'analyse de la stabilité issues de la théorie des systèmes non linéaires. Ces méthodes diffèrent selon que le contrôleur flou a une expression mathématique simple ou pas.

- Si le contrôleur flou peut facilement se mettre sous forme analytique on est ramené à l'étude de la stabilité asymptotique d'un système en boucle fermée non linéaire et on peut alors utiliser la méthode directe de Lyapunov .
- Pour des contrôleurs flous plus complexes, l'expression mathématique étant inexploitable, on doit alors se contenter d'une propriété de secteur géométrique [20] : le contrôleur flou est considéré comme une fonction mathématique non linéaire évoluant dans un secteur géométrique bien défini. On cherchera alors les conditions de stabilité absolue correspondantes à ce secteur, qui peuvent être exprimées soit dans un formalisme d'état soit dans un formalisme entrée sortie.

Les conditions les plus générales de stabilité peuvent être obtenues sans aucune hypothèse sur la nature du système (linéaire, non linéaire, variant, invariant, de dimension finie ou infinie). Cependant, bien que générales, ces conditions sont uniquement suffisantes et difficilement exploitables. C'est pourquoi le système est généralement supposé linéaire invariant de dimension finie bouclé par une non linéarité (ici, contrôleur flou). Selon les propriétés géométriques de cette non linéarité, différents critères de stabilité sont obtenus : critère de cercle, critère de conicité, lemme borné réel, lemme positif réel.

### 5.3. Robustesse

La robustesse, bien que maintes fois constatée, ne possède aucune démonstration rigoureuse. Son explication est à chercher dans l'aspect non linéaire de cette commande qui peut apparaître comme contrôleur de type P.I.D à gains variables ou préprogrammés, selon le point de fonctionnement.

Toutefois, si le modèle du système en boucle fermée est un modèle « *flou dynamique* » de Takagi-Sugeno, on peut se reporter aux travaux de l'automatique classique.

## 6. Propriétés d'un réglage par logique floue

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

- Aptitude à régler convenablement les systèmes avec un comportement dynamique compliqué, dont la modélisation est difficile, voire impossible. A noter que dans le cas du réglage par logique floue, il n'est pas nécessaire d'établir un modèle. Si, pour un certain système à régler, il existe tout de même un modèle mathématique convenable, on peut l'utiliser pour tester et modifier la stratégie de réglage à l'aide d'une simulation numérique. Cela facilite évidemment la mise en service sur l'installation réelle.
- La disponibilité de systèmes de développement efficaces, soit pour microprocesseurs ou PC (solution logicielle), soit pour circuits intégrés (processeurs, fuzzy processors, solution matérielle).

Malgré certains inconvénients tels que :

- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification).
- La précision de réglage souvent peut élevée etc...

On peut affirmer que le réglage par logique floue présente une alternative valable aux réglages conventionnels. Cela est confirmé non seulement par un fort développement dans beaucoup de domaines d'application, mais aussi par des travaux de recherche sur le plan théorique.

## 7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les notions générales de la logique floue et la composition d'un système de commande floue. L'accent a particulièrement été mis sur les différentes étapes dans le traitement des règles d'un contrôleur flou et les différents types de commande en utilisant la logique floue.

Retenons que l'intérêt majeur de la logique floue en commande réside dans sa capacité à traduire une stratégie de contrôle d'un opérateur qualifié en un ensemble de règles linguistique facilement interprétables.

Malheureusement la manipulation de règles non précises peut générer un nombre d'erreurs non négligeable. La mise en place d'un système flou nécessite donc une attention particulière lors de la phase de test de manière à détecter les éventuelles aberrations du système.