الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Département : Génie électrique Et Informatique Industrielle

Mémoire de Master en **automatique**
Spécialité
Automatique et informatique industrielle

Commande par logique floue d'un hélicoptère

Réalisé par

MESSAH Ayoub
AHMED MESSAOUD Walid

Présenté et soutenu publiquement le (04/07/2022)

Composition du Jury :

Président	Mme. BELHACHAT Faiza,	MCA	ENST
Promoteur	M. REZOUG Amar,	MCA	ENST
Co-Promoteur	M.BAIZID KHELIFA,	PHD	IIT, Italie
Examinateur	Mme. REBAI Karima,	MCB	ENST
Examinateur	M.CHOUTRI Khair-Eddine,	MCB	USD-Blida

Année universitaire 2021 –2022

Remerciements

Avant d'entamer la présentation de ce mémoire, nous tenons à remercier du fond du cœur le Bon Dieu de nous avoir accordé toute la patience, le courage, la volonté et la motivation qui nous ont permis d'achever ce travail.

Nous tenons tous d’abord à remercier nos promoteurs Monsieur REZOUG AMAR et Monsieur BAIZID KHELIFA pour leurs disponibilités, leurs confiances ainsi qu’aux précieux conseils pour la réalisation de ce projet de fin d’étude.

Nous remercions nos familles et nos amis qui ont toujours été là pour nous, pour le soutien inconditionnel et les encouragements qu’il nous ont apportés.

Nous remercions nos enseignants de l'école nationale supérieure de Technologie pour leurs efforts voués à nous transmettre leur savoir, en particulier ceux du département Génie électrique et informatique industrielle.

Nous tenons à remercier vivement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce de ce projet de fin d’étude.

Table des matières

Liste des figures II
Liste des Tableaux III
Liste des abbréviations IV
Introduction : 1
I. Modélisation 3
II. Théorie de commande par logique floue 4
II.1. Logique floue type 1 4
II.1.1. Théorie des ensembles flous 5
II.1.2. Opérations sur les ensembles flous 5
II.1. 3. Types de fonctions d'appartenance 6
II.1.4. Contrôleurs flous 6
II.2. Logique floue type 2 8
II.2.1. Fonction d'appartenance 8
II.2.2. Contrôleur intervalle floue type-2 9
IV. Synthèse de la commande floue 12
V. Résultat de Simulation 14
Conclusion Générale : 20
Bibliographie 21
Annexe 22

Liste des figures

Figure 1 Schéma synoptique d'un hélicoptère à DOF 3
Figure 2 Contrôleur flou type 1 7
Figure 3 Ensemble flou type 2 8
Figure 4 Ensemble flou type 2 réduit 9
Figure 5 Contrôleur type 2 intervalle 10
Figure 6 Schéma de commande 12
Figure 7 Ensembles flous des contrôleurs FCT1 et IT2FC 13
Figure 8 Surface de la relation d'entrées-sortie pour le FC 14
Figure 9 Réponse des angles de (a) tangage et de (b) lacet pour la commande floue en régulation pour les commande FCT1 et IT2FC. 15
Figure 10 Signaux de commande générés par les contrôleurs (IT2FC, FCT1) de l'angle de (a) tangage et de (b) lacet 15
Figure 11 Signaux de commande générés par les intégrateurs de l'angle de (a) tangage et de (b) lacet 16
Figure 12 Signaux de commande totale de l'angle de (a) tangage et de (b) lacet 16
Figure 13 Réponse des angles de (a) tangage et (b) lacet pour la commande floue en poursuite de trajectoire 18
Figure 14 Signaux de commande génèrés par les contrôleurs (IT2FC, FC) de l'angle de (a) tangage et de (b) lacet 18
Figure 15 Signaux de commande génèrés par les intégrateurs de l'angle de (a) tangage et de (b) lacet 18
Figure 16 Signaux de commande totale de l'angle de (a) tangage et de (b) lacet 19

Liste des Tableaux

Tableau 1 Les opérations flous 5
Tableau 2 Types d'ensembles flous 6
Tableau 3 Matrice d'inférence floue (règles floues) 13
Tableau 4 Comparaison entre la commande FC et IT2FL en régulation 17
Tableau 5 Comparaison entre la commande FC et IT2FL en poursuite de trajectoire..... 19

Liste des abbréviations

DOF : Degree of freedom

UAV : Unmanned Aerial Vehicle

MIMO : Multiple-Input Multiple-Output

FLS : Fuzzy logic system

MF : Membership function

T1FLC : Type-1 fuzzy logic controller

IT2FLC : Interval type-2 fuzzy logic controller

FC : fuzzy controller

Introduction :

Au cours des dernières années, les véhicules aériens sans pilote (UAV) ont été largement exploités dans les domaines de la recherche et du développement. Les utilisations multiples de ces systèmes sont dues à l'émergence de technologies modernes plus avancées telles que les batteries à densité de puissance, les micro-dispositifs radio à longue portée et à faible puissance, les puissants microprocesseurs et moteurs, etc. Les UAV ont la capacité d'effectuer plusieurs missions telles que, la surveillance, la télédétection, la recherche et le sauvetage, etc.

Cependant, du point de vue automatique, les UAV sont de puissants systèmes non linéaires multi-entrées et multi-sorties (MIMO) qui sont affectés par certaines perturbations (vent variable, charge supplémentaire, etc.) et la conception d'un schéma de contrôle précis et robuste pour ces systèmes est très importante pour réaliser des tâches efficacement.

Pour cela, des prototypes (ou simulateurs) ont été conçus dans le but de tester de nouvelles lois de commandes, qui ne peuvent être implémentées directement sur les systèmes réels.

Le simulateur de vol d'hélicoptère Aero Quanser [1] est l'un des prototypes les plus récents. Ce simulateur est un système multi-variables à deux entrées et deux sorties, caractérisé par une non linéarité forte, un couplage complexe et une dynamique instable en boucle ouverte, l'obtention d'un modèle précis du procédé devient nécessaire. Les méthodes de modélisation traditionnelles s'avèrent souvent incapables de représenter précisément le comportement exact du système. L'automaticien est alors confronté à un problème pour le choix et la synthèse d'une loi de commande. A cet effet, nous utiliserons la commande floue.

Les systèmes à logique floue (FLS) sont un sujet de recherche intéressant en théorie de l'automatisation. Les FLS sont basés sur la théorie des ensembles flous de Zadeh [2]. Cette théorie est proposée afin de traiter des systèmes qui ne sont pas faciles à modéliser et par conséquent difficiles à contrôler. De nombreuses applications montrent que les contrôleurs flous offrent des performances supérieures à celles procurées par les algorithmes de contrôle classiques. De nos jours, le concept d'ensembles flous de type 2 (T2FSs) [3] est proposé comme une nouvelle version de l'ordinaire ensembles flous, car les systèmes de logique floue conventionnels appelés contrôleur de logique floue de type contrôleur (T1FLC) ne peuvent pas entièrement gérer les incertitudes présentées dans les systèmes. Ensuite, la logique floue de type 2 peut être considérée comme une généralisation de la logique floue de type 1, dans le sens où l'incertitude n'est pas seulement limitée sur les variables linguistiques mais est également présentée dans la définition des fonctions d'appartenance (MF). Où les MF des T2FS sont en trois dimensions qui incluent ce que l'on appelle l'empreinte d'incertitude (FLOU). L'empreinte de l'incertitude est une dimension supplémentaire des systèmes flous qui rend habile la gestion des incertitudes. L'architecture générale du contrôleur à logique floue de type 2 intervalle (IT2FLC) contient cinq étapes telles que [4] : Fuzzifier, Rules Base, Fuzzy Inference Engine, Type-Reducer et Defuzzifier.

Le travail est réalisé est résumé de la façon suivante, on commence par analyser et émettre une modélisation du système puis nous introduirons une présentation et implémentation des contrôleurs flous de type 1 et de type 2 respectivement et enfin, nous avons simulé sur MATLAB Simulink les réponses du système aux contrôleurs et comparé les résultats obtenus entre le contrôleur flou de type 1 et contrôleur floue de type 2.

Les objectifs sont :

- Application d'un contrôleur flou sur le simulateur Aero-Quanser.
- Comparaison entre les deux types de contrôleur flou type 1 et type 2.

I. Modélisation

Le simulateur d'hélicoptère Aero Quanser [1] possède deux hélices distantes respectivement de rd e r_y de l'origine. L'hélice horizontale est associée à un moteur à courant continu qui lui permet de tourner autour de l'axe y pour varier l'angle de tangage θ, et l'hélice verticale avec un moteur à courant continu identique génère un couple autour de l'axe z pour varier l'angle de lacet ψ. Les variables d'état du système sont respectivement l'angle de tangage θ et l'angle de lacet ψ et les vitesses. Les deux tensions des moteurs à courant continu sont les entrées du système.

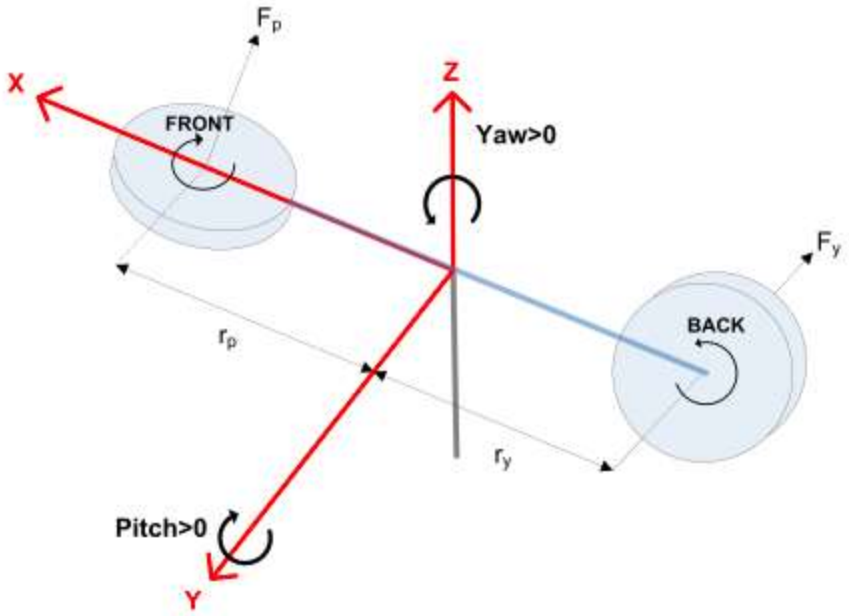


Figure 1 Schéma synoptique d'un hélicoptère à DOF

On note les moments d'inertie J_p et J_y autour des angles de tangage et de lacet, respectivement, les coefficients de frottement visqueux D_p et D_y, les constantes de couple de poussée sont décrites par :

$\boldsymbol{K_{pp}}$: Gain de poussée de couple agissant sur l'axe de tangage à partir de l'hélice de tangage

$\boldsymbol{K_{py}}$: Gain de poussée de couple agissant sur l'axe de tangage de l'hélice à lacet

$\boldsymbol{K_{yp}}$: Gain de poussée de couple agissant sur l'axe de lacet à partir de l'hélice de tangage

$\boldsymbol{K_{yy}}$: Gain de poussée de couple agissant sur l'axe de lacet à partir de l'hélice de lacet

L'hélicoptère est un système multi-entrées-multi-sorties fortement non linéaire. Le système est modélisé à l'aide de la mécanique lagrangienne qui se traduit par les équations de mouvement non linéaires suivantes [5] :

$$\begin{aligned}\left(J_p + ml_c{}^2\right)\ddot{\theta} &= \left(K_{pp}V_p + K_{py}V_y - D_p\dot{\theta} - mglcos(\theta) - ml_c{}^2\dot{\psi}^2 sin(\theta)cos(\theta)\right)\\ \left(J_y + ml_c{}^2 cos^2(\theta)\right)\ddot{\psi} &= \left(K_{yp}V_p + K_{yy}V_y - D_y\dot{\psi} + 2ml_c{}^2\dot{\theta}\dot{\psi}sin(\theta)cos(\theta)\right)\end{aligned} \quad \text{(I.1)}$$

Où, g est la constante de gravité, m est la masse du système, l_c est la distance entre le centre de gravité et l'origine du cadre fixe du corps.

Considérons le vecteur d'état suivant

$$[\theta \quad \dot{\theta} \quad \psi \quad \dot{\psi}] = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4] \tag{I.2}$$

Donc la représentation de l'espace d'état est exprimée comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \dfrac{1}{\left(J_p + m{l_c}^2\right)}\left(K_{pp}V_p + K_{py}V_y - D_p x_2 - mglcos(x_1) - m{l_c}^2 {x_4}^2 sin(x_1)cos(x_1)\right) \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = \dfrac{1}{\left(J_y + m{l_c}^2 cos^2(\theta)\right)}\left(K_{yp}V_p + K_{yy}V_y - D_y x_4 + 2m{l_c}^2 x_2 x_4 sin(x_1)cos(x_1)\right) \end{cases} \tag{I.3}$$

Posons $g_{11} = \frac{K_{pp}}{\left(J_p + m{l_c}^2\right)}$; $g_{12} = \frac{K_{py}}{\left(J_p + m{l_c}^2\right)}$; $g_{21} = \frac{K_{yp}}{\left(J_y + m{l_c}^2 cos^2(\theta)\right)}$; $g_{22} = \frac{K_{yy}}{\left(J_y + m{l_c}^2 cos^2(\theta)\right)}$

$$f_1 = \frac{-D_p x_2 - mgl_c cos(x_2) - m{l_c}^2 {x_4}^2 sin(x_1)cos(x_1)}{\left(J_p + m{l_c}^2\right)}$$

$$f_2 = \frac{-D_y x_4 + 2m{l_c}^2 x_2 x_4 sin(x_1)cos(x_1)}{b}$$

Donc le système est de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_1 + g_{11}V_p + g_{11}V_y \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f_2 + g_{21}V_p + g_{22}V_y \end{cases} \tag{I.4}$$

II. Théorie de commande par logique floue

II.1. Logique floue type 1

La logique floue a été introduite en 1965 par le professeur Lotfi Zadeh avec la publication d'un article intitulé fuzzy_sets [2]. En 1973, Lotfi a proposé d'appliquer la logique floue aux problèmes de contrôle de processus. La partie la plus importante d'un contrôleur flou est l'ensemble des règles de contrôle associées. Par conséquent, un contrôleur flou représente un algorithme qui peut transformer une stratégie de contrôle formelle (langage) basée sur des connaissances expertes en une stratégie de contrôle automatisée. L'expérience a montré que le contrôle flou donne de meilleurs résultats que les algorithmes de contrôle traditionnels. Cependant, en raison de la large gamme de paramètres et d'opérateurs des algorithmes de contrôle flou, il n'existe aucun moyen systématique de concevoir un contrôleur flou.

II.1.1. Théorie des ensembles flous

La théorie des ensembles flous est basée sur le concept d'appartenance partielle. Chaque élément appartient à l'ensemble flou défini partiellement ou graduellement [6]. Par exemple dans le cas de la température il peut être la considérée à la fois comme faible et moyenne avec un degré d'appartenance de 0, 7 et 0.3 respectivement, par contre au logique booléen la température est faible ou moyenne.

L'ensemble flou A de X est défini par la fonction d'appartenance associée à chaque élément x de X. le degré d'appartenance μ_A appartient à l'intervalle [0 1]. Par conséquent, l'ensemble flou peut être exprimé par [7]

$$A = \{(x, \mu_A(x)/\ x \epsilon\ X)\} \qquad \text{(I.4)}$$

II.1.2. Opérations sur les ensembles flous

La théorie classique des ensembles utilise diverses opérations telles que les compléments, les unions et les intersections. La même opération est définie dans la théorie des ensembles flous, Soient A et B deux ensembles flous dans l'univers de discours X avec des fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$ respectivement.

Opération	formule
Union	$\mu_{A\cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_b(x))$ $\quad x \epsilon X$
Intersection	$\mu_{A\cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_b(x))$ $\quad x \epsilon X$
Complément	$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$
Produit	$= \mu_{A_1}(\mu_1) \times \ldots \times \mu_{A_n}(\mu_n)\mu_{A_1\times\ldots\times A_n}(\mu_1, \ldots, \mu_n)$

Tableau 1 Les opérations floue [8]

Toutes les opérations sur les ensembles classiques sont également valables pour l'ensemble flou à l'exception des lois du milieu qui sont donné par $A \cup \bar{A} \neq X$ et $A \cap \bar{A} \neq \emptyset$

II.1. 3. Types de fonctions d'appartenance

La fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ décrit l'appartenance de l'élément x de l'ensemble de base X à l'ensemble flou A, une large classe de fonctions peut être utilisée pour décrire$\mu_A(x)$, la table représente les formes le plus utilisé dans les contrôleurs flous.

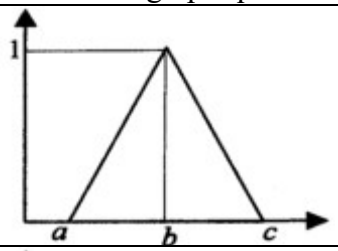
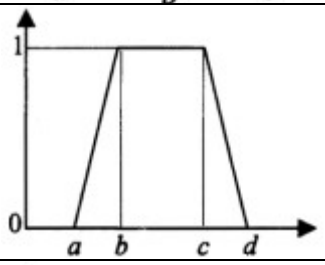
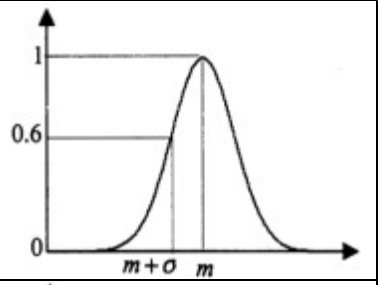
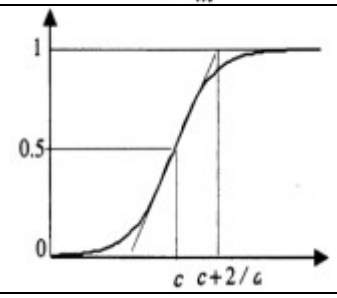
Fonction	Forme algébrique	Forme graphique
Fonction Triangulaire	$\mu_A(x) = max\left(min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right)$	
Fonction Trapézoïdale	$\mu_A(x) = max\left(min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right)$	
Fonction gaussienne	$\mu_A(x) = exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$	
Fonction Sigmoïde	$\mu_A(x) = exp\left(-\frac{1}{1+\exp(-a(x-c))}\right)$	

Tableau 2 Types d'ensembles flous [8]

II.1.4. Contrôleurs flous

Les contrôleurs à logique floue sont basés sur la combinaison de la théorie des ensembles flous et de la logique floue. Les systèmes sont contrôlés par des contrôleurs à logique floue basés sur des règles plutôt que sur des équations. Cet ensemble de règles est connu sous le nom de base de règles, généralement sous la forme d`instructions SI-ET-Alors, la partie SI est connue comme l`antécédent et la partie ALORS est le conséquent. Les antécédents sont reliés à des fonctions booléennes simples telles qu'AND, OR, NOT. La sortie du système est formatée de manière appropriée par le bloc flou. Une fois que toutes les règles ont été définies d'une manière qui convient à leur utilisation, le processus de contrôle commence par le calcul des résultats de la règle. Le calcul de la séquence de règles se fait dans l'unité de calcul. Enfin, l'ensemble flou est défuzzifié en actions de contrôle précises à l'aide du module non flou. Les paramètres de décision pour le contrôleur à logique floue sont [6-7]:

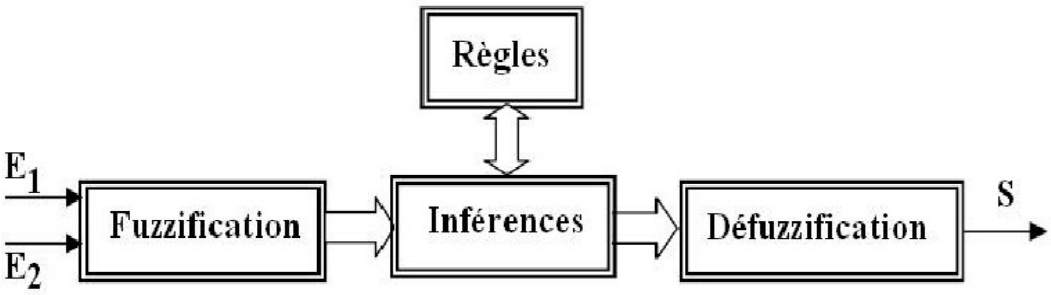


Figure 2 Contrôleur flou type 1

- **Fuzzification** : La fuzzification convertit la quantité d'entrée numérique réelle en une quantité floue c.à.d. cette opération traduit des valeurs d'entrée précises en variables linguistiques. Donc la première étape consiste à déterminer le degré d'appartenance de chaque variable d'entrée à chaque état à l'aide des fonctions d'appartenance (après avoir défini les entrées et les sorties).
- **Inférence** : Consiste à utiliser le moteur d'inférence, qui est un mécanisme permettant de condenser l'information d'un système à travers d'un ensemble de règles définies pour la représentation d'un problème quelconque. Les moteurs d'inférence floue les plus couramment utilisées sont la méthode d'inférence de Mamdani, Takagi-Sugeno (TS). Toutes ces méthodes se ressemblent mais ne diffèrent que par leurs conséquents.
  - La méthode d'inférence floue Mamdani utilise des ensembles flous comme conséquence, Ces contrôleurs sont dits symboliques car la prémisse et la conclusion sont symboliques, donc après l'inférence, il faut passer par une étape de " défuzzification" afin d'obtenir la valeur réelle de la commande à appliquer.
  - La méthode TS donne en conclusion, qui correspond à la commande, une valeur numérique ou une expression polynomiale

Pour les deux moteurs d'inférence les règles sont de forme

$$\boldsymbol{SI}\ E1\ est\ N\ \boldsymbol{ET}\ E2\ est\ P\ \boldsymbol{ALORS}\ S\ est\ Z \qquad \text{(I.5)}$$

Ou E1, E2 et S représente les entrées et la sortie de contrôleur floue, et N, P, Z sont des variables linguistiques

- **Agrégation** : l'ensemble flou de sortie globale est construit en agrégeant les ensembles flous obtenus par chaque règle associée à cette sortie. Les règles sont liées par un opérateur logique "OU" ou "ET", on calcule donc le maximum ou le minimum entre les fonctions d'appartenance obtenues à partir de chaque règle.
- **Défuzzification** : A la fin de l'inférence, l'ensemble flou de sortie est déterminé, mais il ne peut pas être utilisé directement pour fournir une information précise à l'opérateur ou pour commander l'actionneur.il faut transférer les valeurs floues aux nombres réels. Il existe plusieurs méthodes

Méthode du centre de gravité : C'est la méthode de défuzzification la plus courante. L'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultant de l'inférence correspond à la valeur de sortie du régulateur.

$$dU_n = \frac{\int x\mu_{Ri}(x)}{\int \mu_{Ri}(x)} \qquad \text{(I.6)}$$

Méthode des hauteurs pondérées : Cette méthode est surtout utilisée quand les fonctions d'appartenance de la variable de sortie sont des singletons.

$$dU_n = \frac{\sum x\mu_{Ri}(x)}{\sum \mu_{Ri}(x)} \quad \text{(I.7)}$$

II.2. Logique floue type 2

La notion des ensembles flous de type-2 a été proposée par Lotfi Zadeh [3] comme extension aux ensembles flous types-1. Un ensemble flou type-2 $\hat{A}$ est caractérisé par deux fonctions d'appartenance primaire et secondaire [9].

$$\hat{A} = \{((x,u), \mu_{\hat{A}}(x,u) / \ x \in X)\} \quad \text{(I.8)}$$

Ou $\mu_{\hat{A}}(x,u)$ est la fonction d'appartenance secondaire

La valeur d'appartenance de chaque élément de l'ensemble est un nombre flou dans [0,1] comme illustrées dans la figure. L'avantage principal de la logique floue type-2 par rapport à la logique floue type-1 est sa capacité de prendre en compte les incertitudes linguistiques et numériques

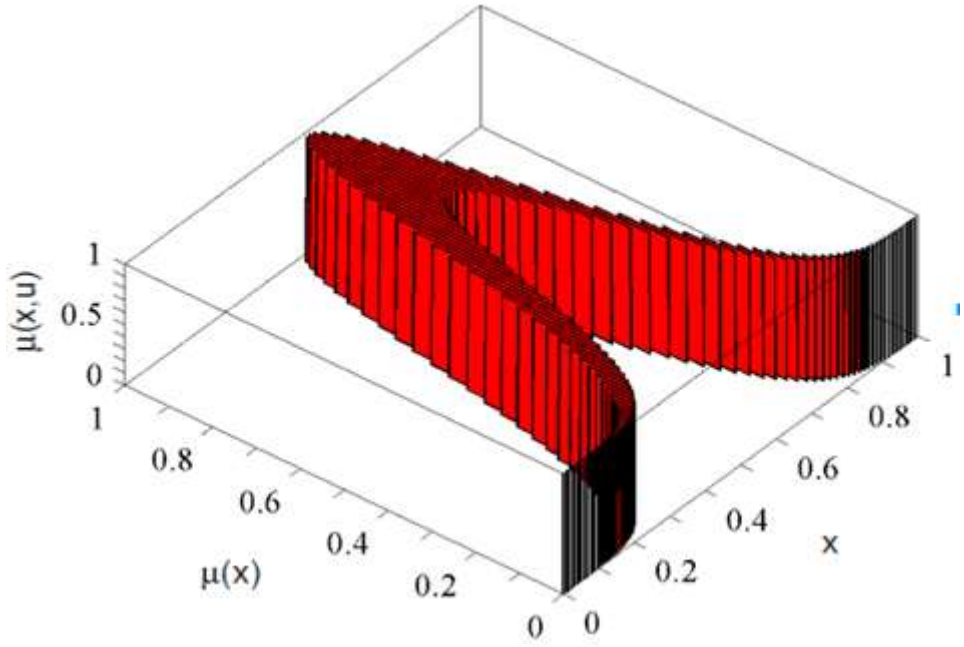


Figure 3 Ensemble flou type 2

II.2.1. Fonction d'appartenance

La fonction d'appartenance de l'ensemble flue type 2 est caractérisé par Une fonction d'appartenance supérieure et une fonction d'appartenance inférieures sont deux fonctions d'appartenance de type 1 [10].

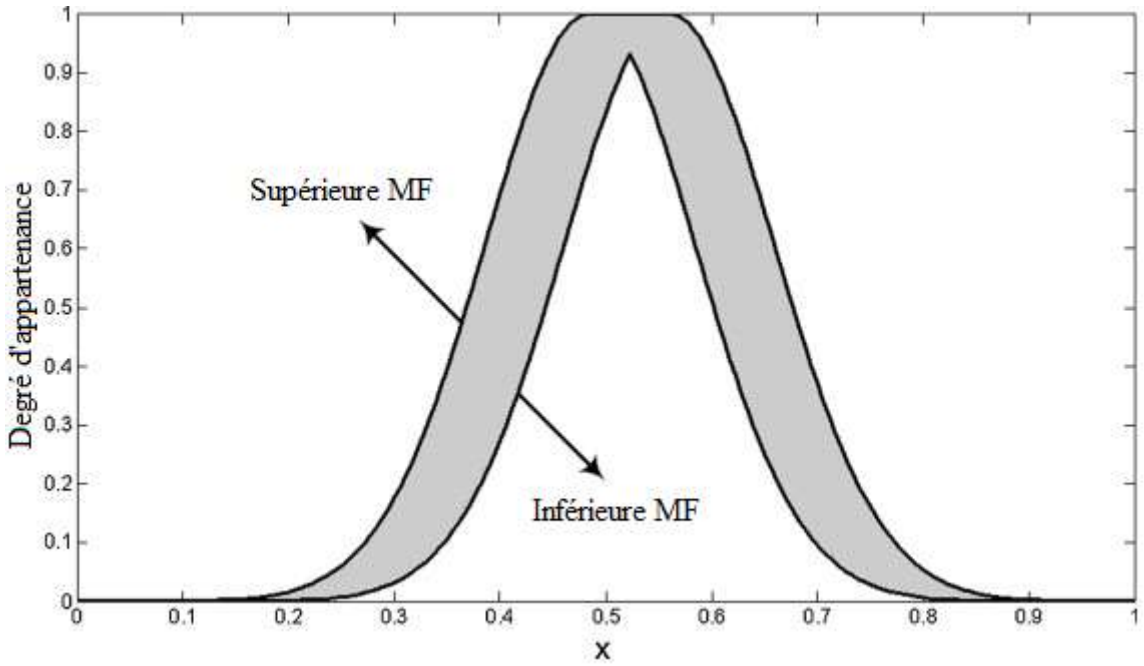


Figure 4 Ensemble flou type 2 réduit

L'incertitude dans les appartenances primaires d'un ensemble flou de type 2, Ã, consiste en une région délimitée que nous appelons « l'empreinte de l'incertitude », (région gris sur la figure). Mathématiquement, c'est l'union de toutes les fonctions d'appartenance primaires

La fonction d'appartenance supérieure est associée à la borne supérieure de « l'empreinte de l'incertitude » Ã est notée $\overline{\mu}_{\hat{A}}(x)$. Et La fonction d'appartenance inférieure est associée à la borne inférieure notée $\underline{\mu}_{\hat{A}}(x)$.

II.2.2. Contrôleur intervalle flou type-2

Le contrôleur flou de type 2 est une sorte de relation d'application basée sur la théorie des ensembles flous de type 2 [4]. Étant donné que le raisonnement du système de logique floue de type 2 est très intensif, ce qui résulte à une intensivité en termes de calcul. Si le degré d'appartenance secondaire est 0 ou 1 [11], l'ensemble flou de type 2 peut être modifié en un ensemble flou de type 2 d'intervalle. Le système flou de type 2 est composé des mêmes composants que le système Contrôleur flou type 1 avec un composant supplémentaire qui est le réducteur de type.

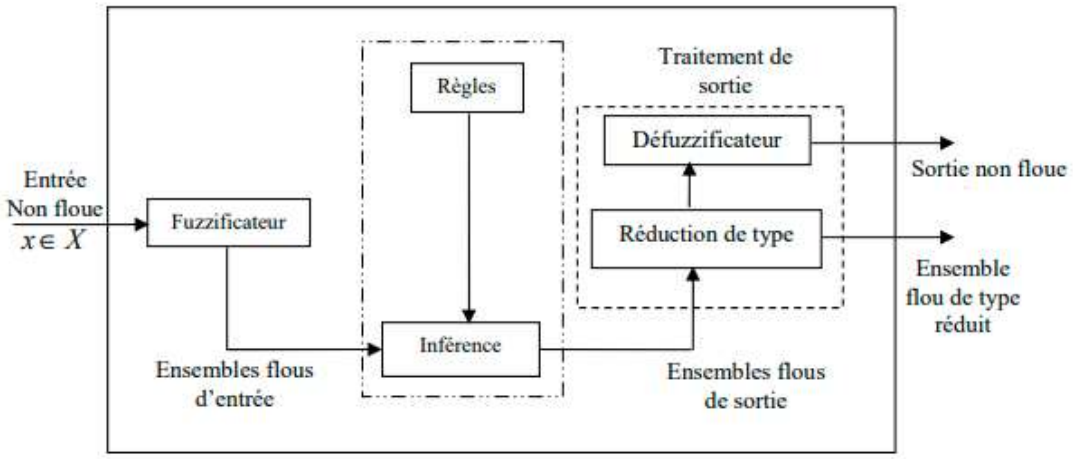


Figure 5 Contrôleur type 2 intervalle

La fuzzification dans IT2FC est la même que le CFT1, qui est utilisé pour mapper l'entrée $x = (x_1, x_1 \dots x_n)$ dans différents types d'ensembles flous, puis déterminer la sortie correspondante à l'aide de moteurs d'inférence floue, la base des règles est donnée pour le $l$éme règle comme suit

$$\begin{gathered} Si\ x_1\ est\ \hat{F}_1^l\ et\ x_2\ est\ \hat{F}_2^l, \dots, x_p\ est\ \hat{F}_1^l, Alors\ y^l = f(x_1, x_2, \dots., x_p) \\ Si\ x_1\ est\ \widehat{F_1^l}\ et\ x_2\ est\ \widehat{F_2^l}, \dots, x_p\ est\ \widehat{F_p^l}, Alors\ y^l = \widehat{G^l} \end{gathered} \tag{I.9}$$

Alors le résultat du raisonnement de la $l$ème règle est :

$$\begin{aligned} \mu_{\widehat{B^l}} = \mu_{\widehat{G^l}}(y) \sqcap \Bigg\{ \sqcup_{x \epsilon X} \Bigg\{ \Big[\mu_{\widehat{X_1}}(x_1) \sqcap \mu_{\widehat{F_1^l}}(x_1) \Big] \sqcap \dots \\ \sqcap \Big[\Big[\mu_{\widehat{X_p}}(x_p) \sqcap \mu_{\widehat{F_p^l}}(x_p) \Big] \Big] \Bigg\} \Bigg\} \end{aligned} \tag{I.10}$$

Pour la fuzzification en un seul point de l'entrée, l'équation ci-dessus peut être simplifiée comme suit

$$\mu_{\widehat{B^l}} = \mu_{\widehat{G^l}}(y) \sqcap \Big\{ \sqcup_{x \epsilon X} \Big\{ \mu_{\widehat{F_1^l}}(x_1) \sqcap \dots \sqcap \mu_{\widehat{F_p^l}}(x_p) \Big\} \Big\} \tag{I.11}$$

L'inférence des antécédents peut être abordée comme suit en raison des ensembles flous de type 2

$$\begin{aligned} \overline{f}^l &= \Big[\overline{\mu}_{\widehat{X_1}}(x_1) \sqcap \overline{\mu}_{\widehat{F_1^l}}(x_1) \Big] \sqcap \dots \sqcap \Big[\Big[\overline{\mu}_{\widehat{X_p}}(x_p) \sqcap \overline{\mu}_{\widehat{F_p^l}}(x_p) \Big] \Big] \\ \underline{f}^l &= \Big[\underline{\mu}_{\widehat{X_1}}(x_1) \sqcap \underline{\mu}_{\widehat{F_1^l}}(x_1) \Big] \sqcap \dots \sqcap \Big[\Big[\underline{\mu}_{\widehat{X_p}}(x_p) \sqcap \underline{\mu}_{\widehat{F_p^l}}(x_p) \Big] \Big] \end{aligned} \tag{I.12}$$

Pour un système flou type-2, chaque ensemble de sortie d'une règle est de type-2. Dans ce contexte, on trouve des **variations** généralisées des méthodes de défuzzification qui peuvent

nous fournir un ensemble de type-1 à partir des ensembles de sorties de type-2. On appelle cette opération « Réduction de type » au lieu de défuzzification, et on appelle l'ensemble résultant de type 1 « Ensemble réduit ». Le défuzzificateur dans un système flou type-2 peut alors défuzzifié l'ensemble réduit pour obtenir une sortie ordinaire non floue pour le système flou type-2

La sortie finale est également un ensemble d'intervalles de type 1 et est calculée comme suit

$$Y_{cos}(Y^1, \dots, Y^M;\ F^1, \dots, F^M) = \int_{y^1} \dots \int_{y^M} \int_{f^1} \dots \int_{f^M} \frac{\sum_{i=1}^{M} f^i}{\sum_{i=1}^{M} f^i y^i} \qquad \text{(I.13)}$$

Où y_l et y_r déterminent Y_{cos}, $y^i = [y_l, y_r]$

$$y_l = \frac{\sum_{i=1}^{M} f^i\, y^i}{\sum_{i=1}^{M} f^i} \qquad \text{(I.14)}$$

$$y_r = \frac{\sum_{i=1}^{M} f_r^i y_r^i}{\sum_{i=1}^{M} f_r^i} \qquad \text{(I.15)}$$

Et la sortie défuzzifiée est :

$$y = \frac{y_r + y_l}{2} \qquad \text{(I.16)}$$

IV. Synthèse de la commande floue

Le système a été commandé à l'aide d'un contrôleur flou de type 1 (FC) et d'un contrôleur flou de type 2 à intervalle (IT2FC), les contrôleurs flous ont été sommés avec une action intégral en parallèle, afin de régler les angles de tangage et de lacet du Quanser Aero, comme illustré dans la figure ci-dessous

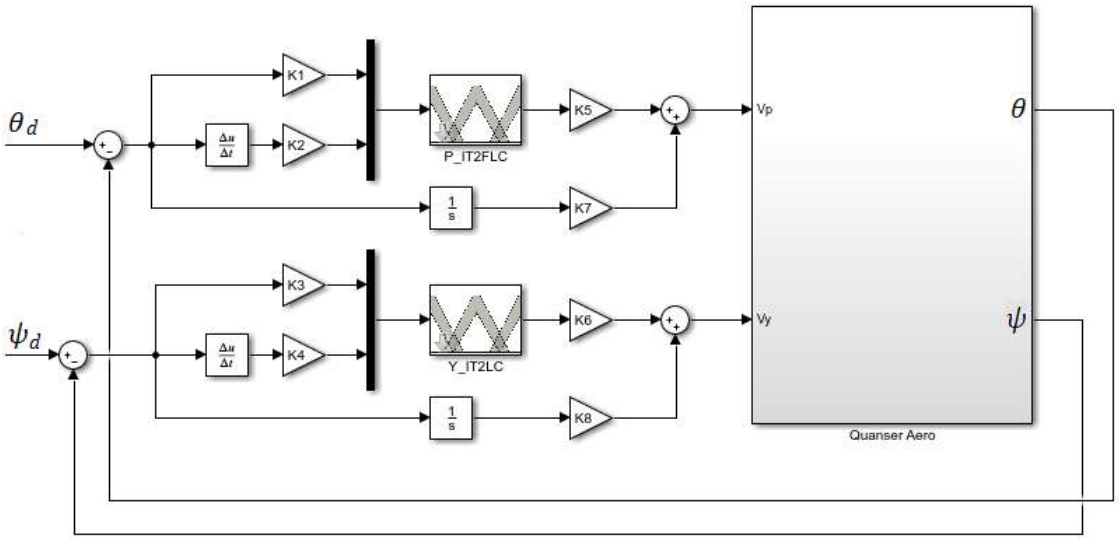
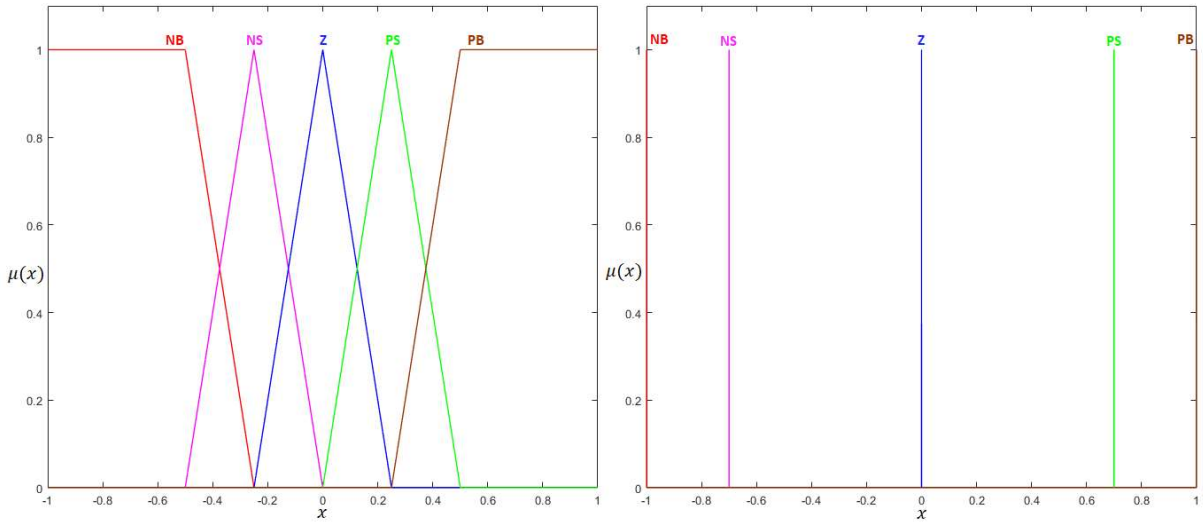


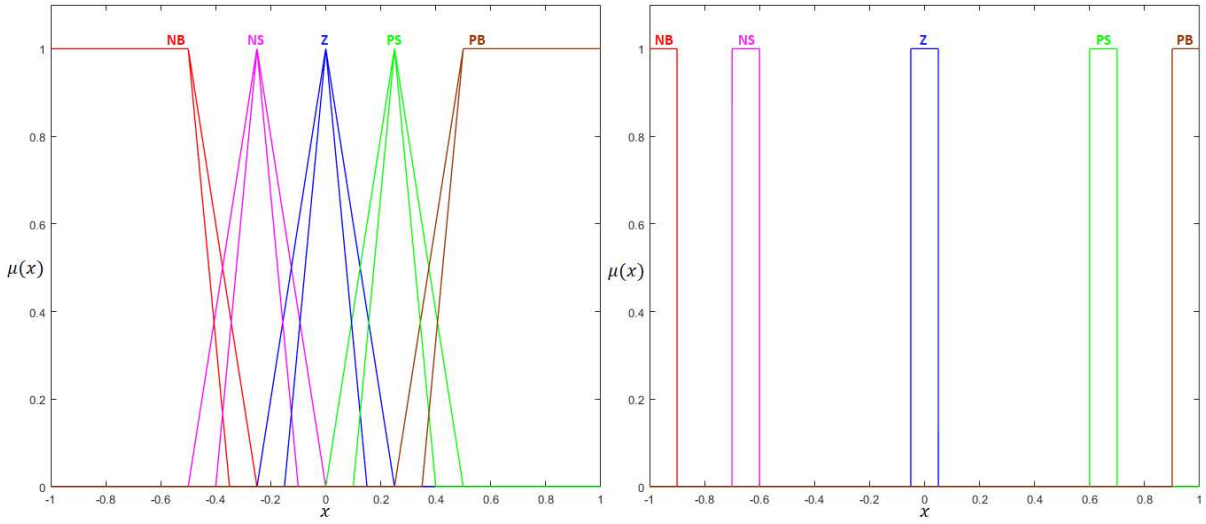
Figure 6 Schéma de commande

Où K1, K2, K3 et K4 sont les gains d'entrées et K5, K6 sont les gains de sortie des contrôleurs flous, tandis que K7 et K8 représentent les gains des intégrateurs.

Notre contrôleur flou est basé sur le système d'inférence de Takagi-Sugeno d'ordre zéro. Ce contrôleur a deux entrées, et e_c qui sont respectivement l'erreur et la variation d'erreur, et une seule sortie qui est la tension appliquée à chaque moteur. Le contrôleur flou admet cinq ensembles flous pour les entrées et la sortie. Les labels utilisés des entrées/sortie sont {NB NS ZO PM PB}. Les ensembles flous pour les entrées sont de forme trapézoïdale et triangulaire, définis par les paramètres a, b, c et d. Les sorties des contrôleurs sont des singletons. Ces caractéristiques sont valables pour les deux contrôleurs flous de type 1 et de type 2.



(a) (b)



(c) (c)

Figure 7 Ensembles flous des contrôleurs FCT1 et IT2FC

Les règles floues sont résumées dans le tableau 3 suivant

$\dot{e}\backslash e$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	Z
NS	NB	NB	NS	Z	PS
Z	NB	NS	Z	PS	PB
PS	NS	Z	PS	PB	PB
PB	Z	PS	PB	PB	PB

Tableau 3 Matrice d'inférence floue (règles floues)

Les ensembles flous sont notés comme suit :

- NB : Négatif grand

- NS : Négatif petit

- Z : Environ zéro

- PS : Positif petit

- PB : Positif grand

La logique de détermination de cette matrice des règles est basée sur une connaissance globale ou qualitative du fonctionnement du système. A titre d'exemple, prenons les deux règles suivantes :

Si e est NB et $\dot{e}$ est NB alors V est NB

Si e est Z et $\dot{e}$ est PS alors V est PS

La relation d'entrées/ sortie est données par la surface de la figure 8.

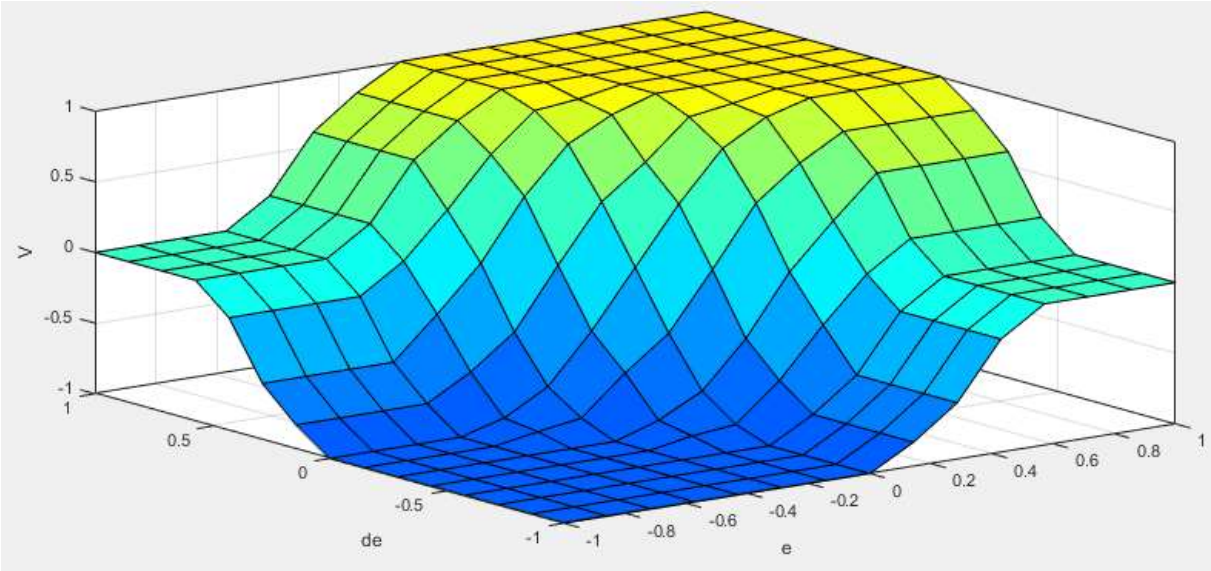
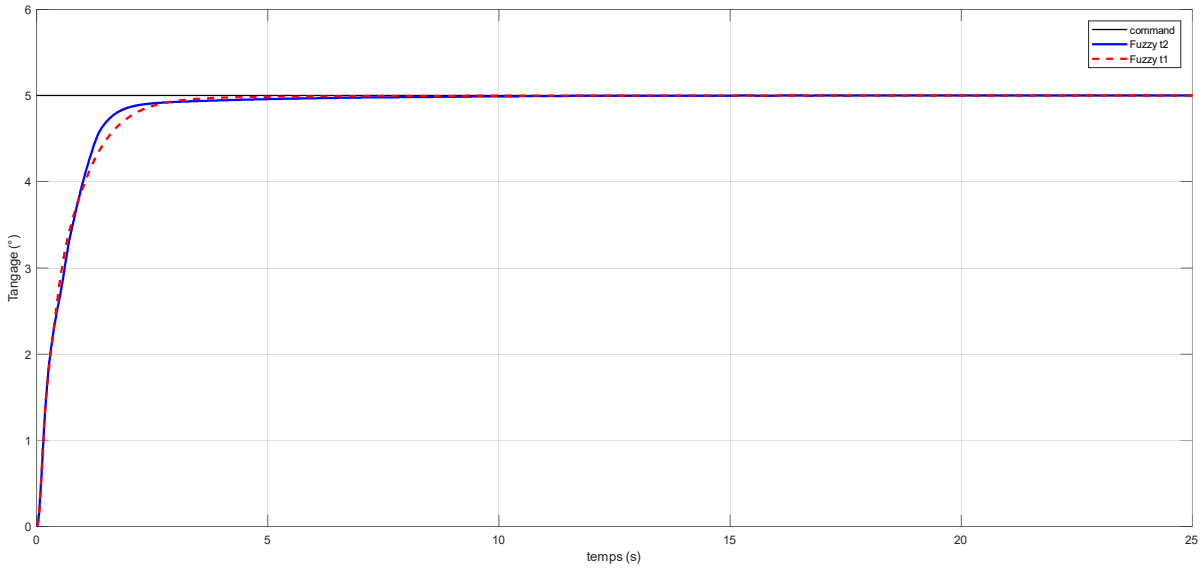


Figure 8 Surface de la relation d'entrées-sortie pour le FC

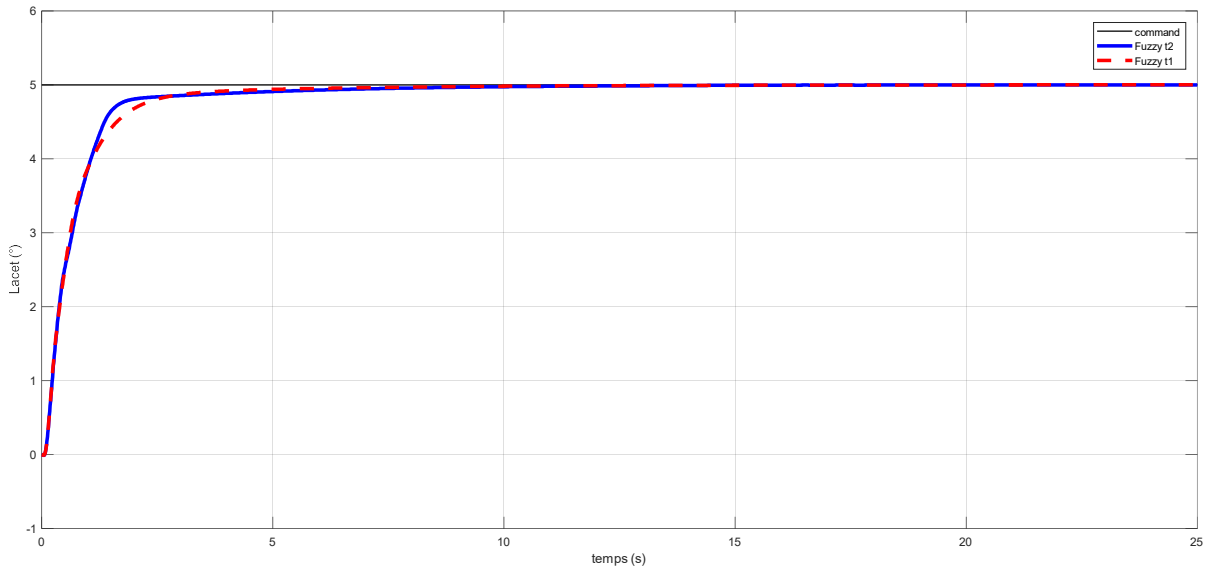
V. Résultat de Simulation

Deux types de simulation ont été réalisés, en mode régulation et en mode poursuite de trajectoire, pour tous les cas les commandes ont été présentées et des performances ont été résumées dans des tableaux. Afin de voir l'influence de l'intégrateur sur la commande floue, ses courbes sont présentées séparément. La consigne en régulation est de 5 degré pour les deux angles (tangage et lacet).

- Régulation

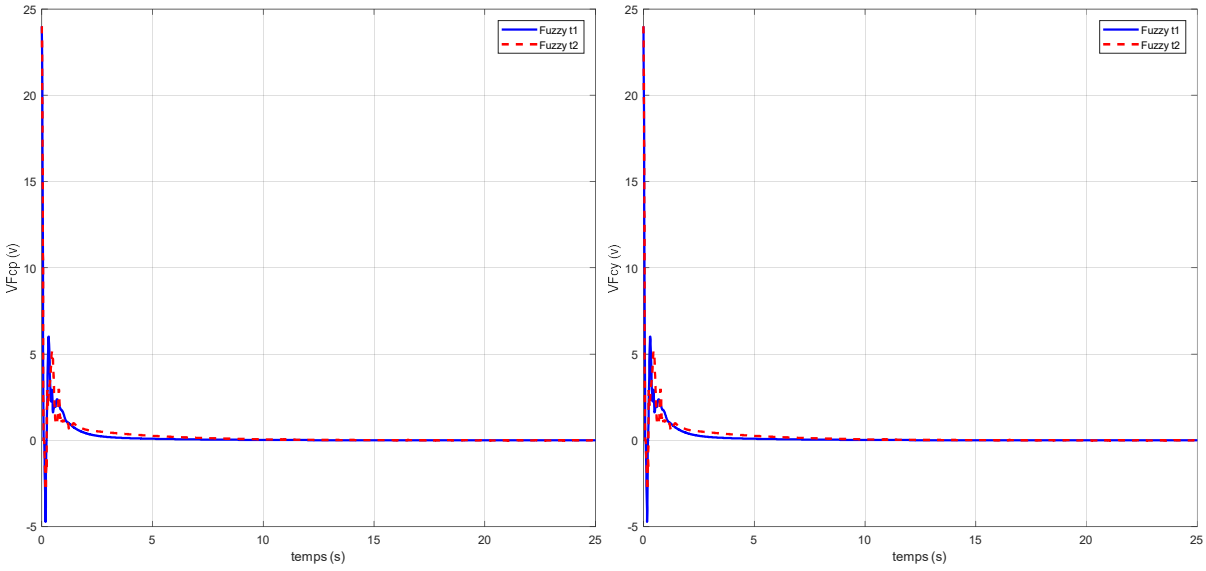


(a)



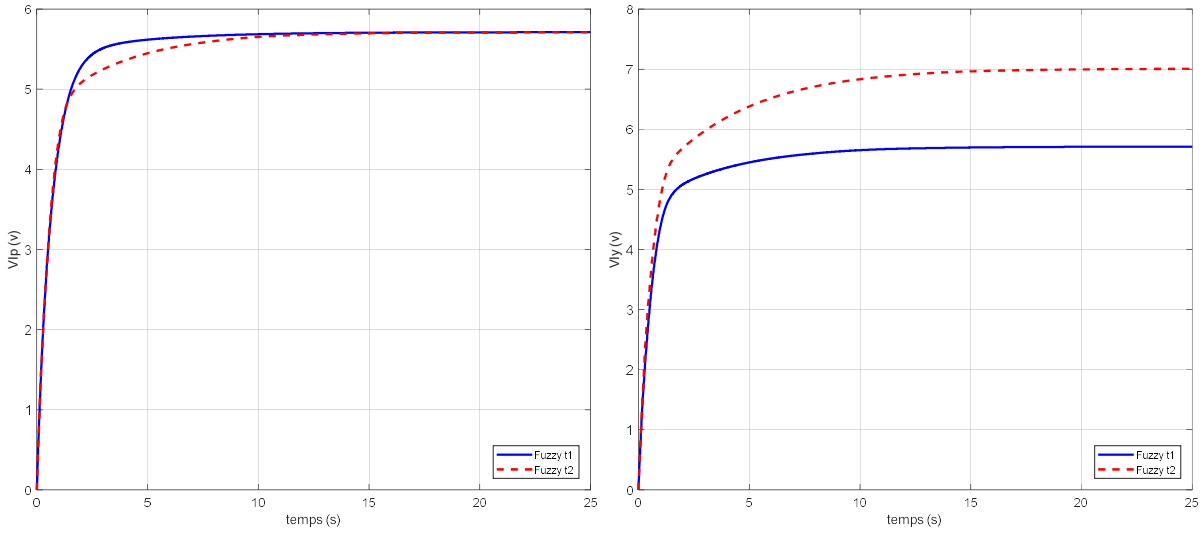
(b)

Figure 9 Réponse des angles de (a) tangage et de (b) lacet pour la commande floue en régulation pour les commande FCT1 et IT2FC.



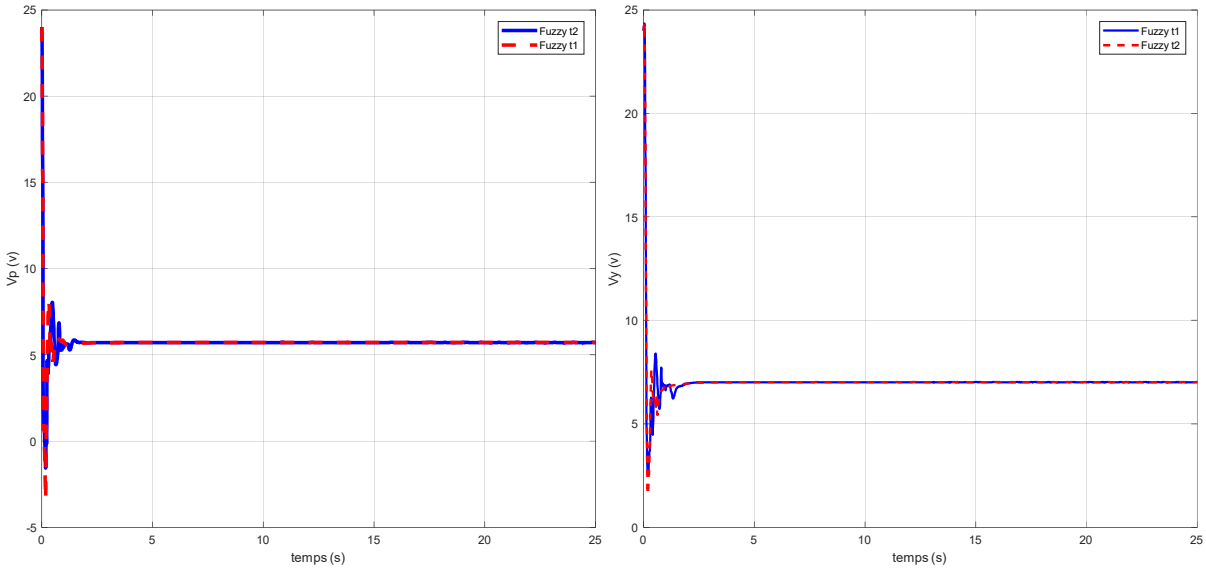
(a) (b)

Figure 10 Signaux de commande générés par les contrôleurs (IT2FC, FCT1) de l'angle de (a) tangage et de (b) lacet



(a) (b)

Figure 11 Signaux de commande générés par les intégrateurs de l'angle de (a) tangage et de (b) lacet



(a) (b)

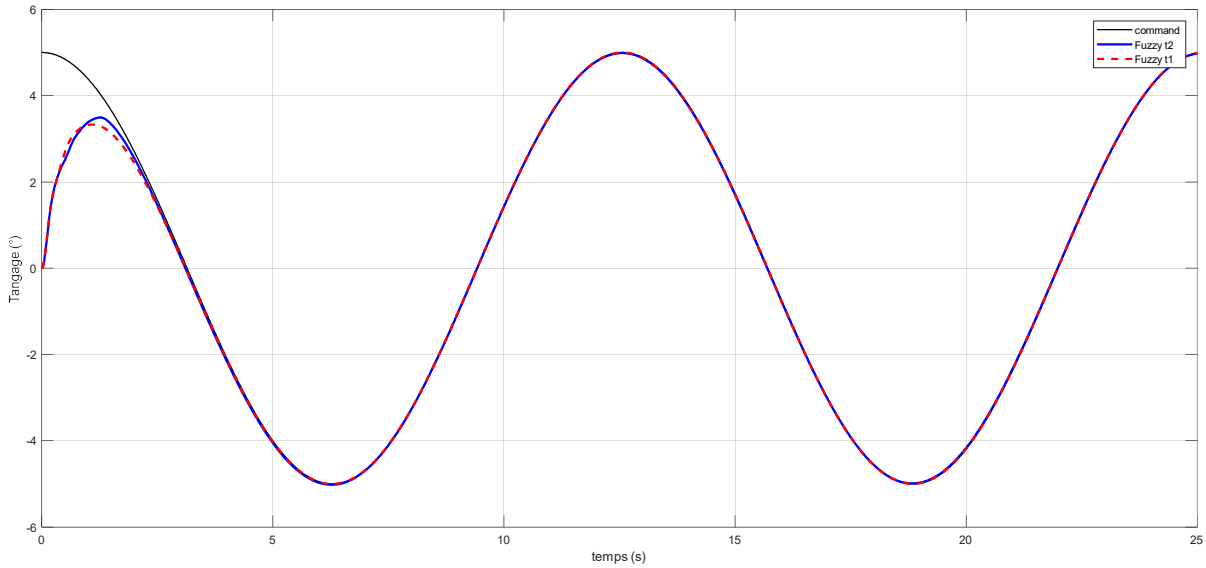
Figure 12 Signaux de commande totale de l'angle de (a) tangage et de (b) lacet

Le tableau 4 présente les performances obtenues.

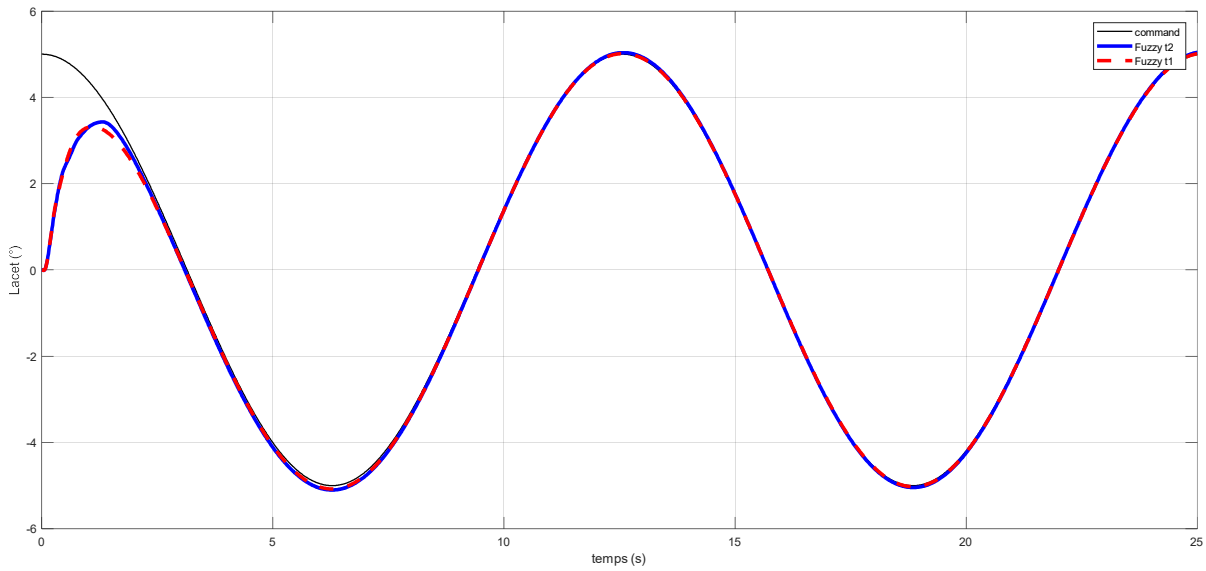
Angles	Commande	$\int e^2$	$\int t\|e\|$
Tangage	FLC	**0.002374**	**0.04360**
	IT2FLC	0.002388	0.05174
Lacet	FLC	0.002955	**0.07529**
	IT2FLC	**0.002953**	0.08387

Tableau 4 Comparaison entre la commande FC et IT2FL en régulation

- Poursuite : en poursuite de trajectoire la même amplitude que la régulation est adoptée (i.e. 5 degré). En poursuite d'autres dynamiques seront excitées et ceci va permettre d'examiner les deux contrôleurs flous de type 1et de type 2. Les commandes des actions intégrales ont été également données afin de visualiser son importance sur la totalité de la commande.

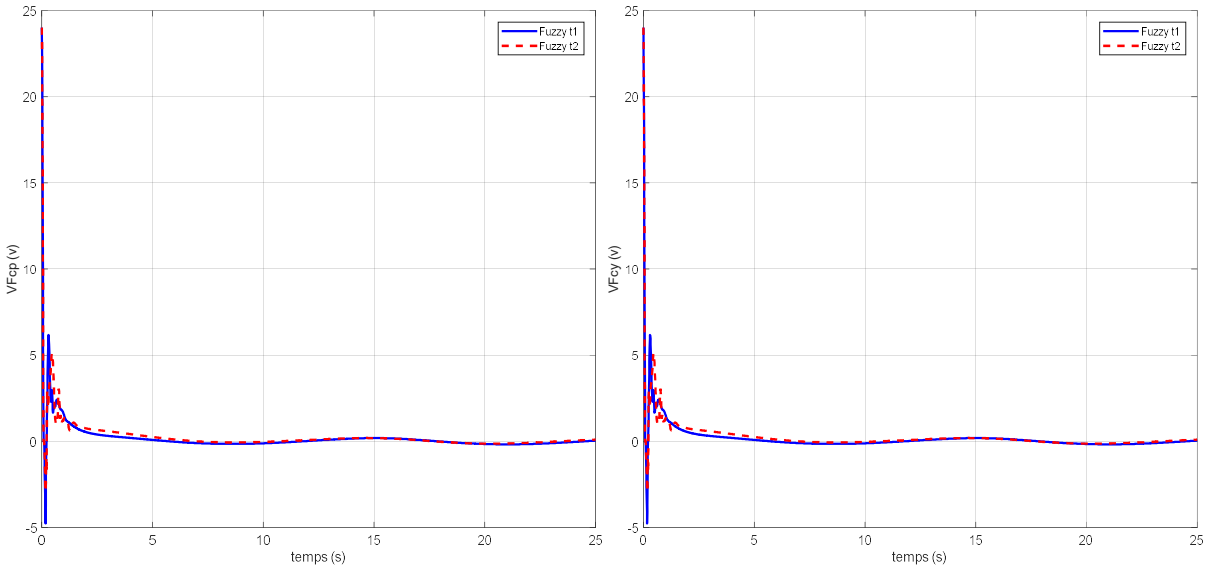


(a)



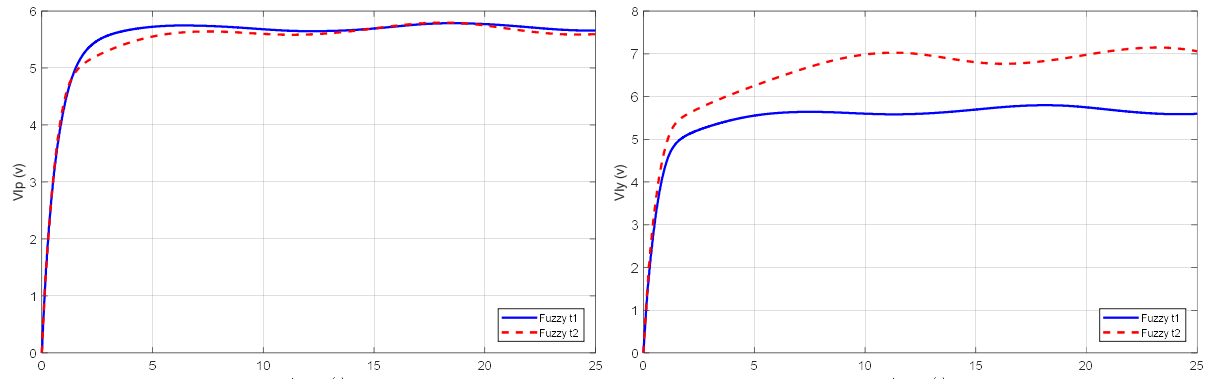
(b)

Figure 13 Réponse des angles de (a) tangage et (b) lacet pour la commande floue en poursuite de trajectoire



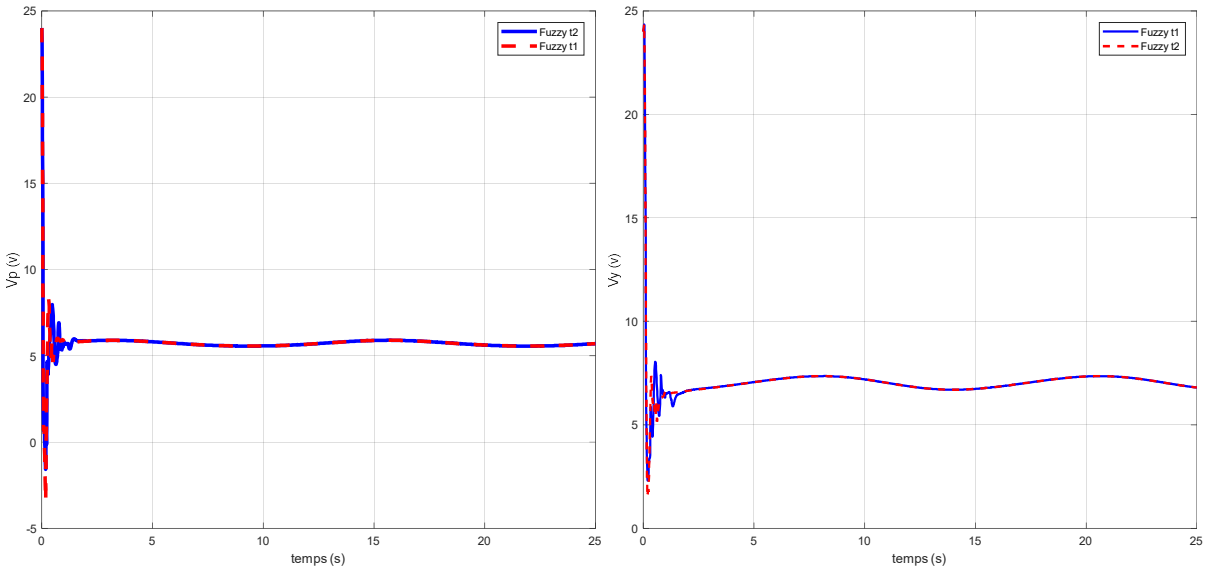
(a) (b)

Figure 14 Signaux de commande générés par les contrôleurs (IT2FC, FC) de l'angle de (a) tangage et de (b) lacet



(a) (b)

Figure 15 Signaux de commande générés par les intégrateurs de l'angle de (a) tangage et de (b) lacet



(a) (b)

Figure 16 Signaux de commande totale de l'angle de (a) tangage et de (b) lacet

Les performances des commandes dans le cas de la poursuite de trajectoire sont résumées dans le tableau 5.

Angles	Commande	$\int e^2$	$\int t\|e\|$
Tangage	FLC	0.002943	**0.1819**
	IT2FLC	**0.002833**	0.2035
Lacet	FLC	0.004053	**0.3120**
	IT2FLC	**0.004020**	0.3911

Tableau 5 Comparaison entre la commande FC et IT2FL en poursuite de trajectoire

➢ *Interprétations et discussions :*

D'après les résultats obtenus dans les figures (9,13), on peut voir que l'IT2FC a les meilleures performances en régime transitoires que le FC de type 1. Ceci peut également être confirmé par les tableaux (4), où l'indice ISE a diminué de 1% pour l'angle de tangage dans la commande IT2FC, ce qui le rend plus précise que FC de type 1. On remarque que les tensions V_p et V_y des deux contrôleurs flous sont dominés par les intégrateurs en régime permanent, ce qui peut conduire à des commandes floues négligeables, comme indiqué sur la figure (10,11,14,15). Ainsi on conclut que l'IT2FC gère le comportement du système en régime transitoire et l'intégrateur diminue l'erreur statique en régime permanent.

Conclusion Générale :

L'objectif principal de ce mémoire est l'application d'une commande intelligente à base d'un contrôleur flou sur le simulateur de vol Aero Quanser pour le commander sans passer par son modèle mathématique. Ce dernier est un système multi variables à deux entrées et deux sorties, caractérisé par des non linéarités fortes, un couplage complexe et une dynamique instable en boucle ouverte.

La première partie fut une présentation du simulateur de vol Aero Quanser avec ses caractéristiques et modèle dynamique pour mieux appréhender son fonctionnement.

Dans la seconde partie, nous avons présenté la commande floue et la philosophie derrière le fonctionnement de la logique floue de type 1 et de type 2. Le choix des fonctions d'appartenances et des règles floues que suit le contrôleur ont été présentés.

Nous avons clôturé notre travail par une comparaison entre la commande par le contrôleur flou type 1 et type 2 en cas de régulation et en cas de poursuite, pour étudier la robustesse et l'adaptabilité de ces commandes, nous avons conclu que le fait de renforcer les fonctions d'appartenance la logique floue type 2 augmente les performances et permet un suivi plus précis et dynamique.

Bibliographie

[1] Quanser Inc, Quanser AERO Laboratory Guide, Quanser: Arkham, Canada, 2016.

[2] ZADEH, Lotfi A. Fuzzy sets. In: *Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems: selected papers by Lotfi A Zadeh*. 1996. p. 394-432.

[3] ZADEH, Lotfi Asker. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information sciences*, 1975, vol. 8, no 3, p. 199-249.

[4] LIANG, Qilian et MENDEL, Jerry M. Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design. *IEEE Transactions on Fuzzy systems*, 2000, vol. 8, no 5, p. 535-550.

[5] ABDELMAKSOUD, Sherif I., MAILAH, Musa, et ABDALLAH, Ayman M. Practical real-time implementation of a disturbance rejection control scheme for a twin-rotor helicopter system using intelligent active force control. *IEEE Access*, 2020, vol. 9, p. 4886-4901.

[6] BOUKAKA, Salim. *Réalisation d'une bibliothèque de lois de commande adaptative our MSAP*. 2015. Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières.

[7] TERKI, AMEL. *Contrôle Flou-Génétique Hybride d'un Moteur BLDC dans un Système de Pompage photovoltaïque*. 2011. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.

[8] BAHLOUL, Omar. *Type -2 Fuzzy Control For Twin Rotor (TRMS*). Mémoire de master, Université Kasdi Merbah-Ourgla, 2015.

[9] HAMIZI, Abdelhakim. *Commande Adaptative Floue Type-2 d'un Bras Manipulateur*. 2012. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.

[10] BAHLOUL, Omar. *Commande par logique floue type -2-appliquée à la machine asynchrone* . Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'Sila, 2016.

[11] SUN, Zhe, LING, Yawen, TAN, Xin, *et al.* Designing and application of type-2 fuzzy PID control for overhead crane systems. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 2021, vol. 5, no 1, p. 10-22.

[12] ZEGHLACHE, Samir, KARA, Kamel, et SAIGAA, Djamel. Type-2 fuzzy logic control of a 2-DOF helicopter (TRMS system). *Open Engineering*, 2014, vol. 4, no 3, p. 303-315.

[13] LOUTFI, Benyettou, SAMIR, Zeghlache, ALI, Djerioui, *et al.* Real time implementation of type-2 fuzzy backstepping sliding mode controller for twin rotor MIMO system (TRMS). *Traitement du Signal*, 2019, vol. 36, no 1, p. 1-11.

[14] KIM, Seok-Kyoon et AHN, Choon Ki. Performance-Boosting Attitude Control for 2-DOF Helicopter Applications via Surface Stabilization Approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, vol. 69, no 7, p. 7234-7243.

Annexe

Les valeurs numériques des différents paramètres du Aero Quanser sont données par :

Symbole	Description	Valeur
Moteur a courant continue		
R_m	Résistance terminale	$8.4\ \Omega$
K_t	Constante de couple	$0.042\ \mathrm{N.m/A}$
K_m	Constante f.e.m moteur	$0.042\ \mathrm{V/(rad/s)}$
J_m	Moment d'inertie du moteur	$4.04\ 10^{-6}\ \mathrm{Kg.m^2}$
L_m	Inductance du moteur	$1.16\ \mathrm{mH}$
Hélice		
K_d	Coefficient de traînée	$10^{-5}\ \mathrm{V/(rad/s)}$
J_h	Inertie du moyeu d'hélice	$3.04\ 10^{-9}\ \mathrm{Kg.m^2}$
J_p	Inertie de l'hélice	$7.2\ 10^{-6}\ \mathrm{Kg.m^2}$

Tableau Paramétrées de l'hélice et le moteur a courant continue de l'Aero Quanser [1]

Symbole	description	valeur
J_p	Moment d'inertie autour de l'axe de tangage	0.0215 Kg.m^2
J_y	Moment d'inertie autour de l'axe de lacet	0.0237 Kg.m^2
D_p	constante de frottement de tangage	0.0071 N/V
D_y	constante de frottement de lacet	0.0220 N/V
K_{pp}	Gain de poussée de couple agissant sur l'axe de tangage à partir de l'hélice de tangage	0.0011 N.m/V
K_{py}	Gain de poussée de couple agissant sur l'axe de tangage de l'hélice à lacet	0.0021 N.m/V
K_{yp}	Gain de poussée de couple agissant sur l'axe de lacet à partir de l'hélice de tangage	-0.0027 N.m/V
K_{yy}	Gain de poussée de couple agissant sur l'axe de lacet à partir de l'hélice de lacet	0.0022 N.m/V
l_c	Distance du centre de masse au corps fixe origine du cadre	0.002 m
m	Masse	1.075 Kg
g	Accélération de la gravitation	9.8065 m/s^2

Tableau Paramétrées de l'Aero Quanser [14]

الملخص:

العمل المقدم في هذه المدكرة يتعلق بتطبيق متحكم ضبابي على جهاز محاكاة طيران الهليكوبتر أيرو كونسر في الخطوة الأولى، قمنا بتقديم وصف وخصائص الهليكوبتر أيرو كونسر ونموذجها رياضي. ثانياً، قدمنا التحكم الضبابي وفلسفته، ثم قمنا بتنفيذ النوع 1 والنوع 2 من المتحكمات الضبابية، وأخيراً قمنا بمقارنة النتائج التي تم الحصول عليها في التنظيم وتتبع المسار. سمح لنا هذا النهج بتطبيق تحكم ذكي مباشرة على النظام دون المرور بنموذجه وبالتالي تجنب نمذجة حالات عدم اليقين ولكن أيضًا التأكيد على الخصائص المحددة لنوعي وحدات التحكم.

كلمات مفتاحية: المنطق الضبابي نوع 1، منطق الضبابي نوع 2، التحكم الضبابي، أيرو كونسر,

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'application d'un contrôleur flou sur le simulateur de vol Aero Quanser. Dans une première étape, nous avons présenté une description et les caractéristiques de l'Aero Quanser et son modèle. Dans un second lieu, nous avons présenté la commande floue et sa philosophie, puis, nous avons implémenté les contrôleurs flous de type 1 et type 2 et finalement, comparer leurs résultats obtenus en régulation et en poursuite de trajectoire. Cette approche nous a permis, d'appliquer une commande intelligence directement au système sans passer par son modèle et ainsi éviter les incertitudes de modélisation mais, aussi souligner les caractéristiques propres aux deux types de contrôleurs

Mots clé : Logique floue type 1, Logique floue type 2, Commande floue, Aero Quanser.

Abstract:

The work presented in this thesis concerns the application of a fuzzy controller on the Aero Quanser flight simulator. In a first step, we presented a description and the characteristics of the Aero Quanser and its model. In a second place, we presented the fuzzy control and its philosophy, then, we implemented the type 1 and type 2 fuzzy controllers and finally, compared their results obtained in regulation and trajectory tracking. This approach allowed us to apply an intelligence command directly to the system without going through its model and thus avoid modelling uncertainties but also underline the characteristics specific to the two types of controllers.

Key words: fuzzy logic type 1, fuzzy logic type 2, fuzzy control, Aero Quanser.