

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DU
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

SPECIALITE : COMMANDE DES SYSTEMES ELECTRIQUES

THEME

COMMANDE FLOUE D'UN SIMULATEUR D'HELICOPTERE TRMS

Proposé et dirigé par :

-Mr. ZEGHLACHE Samir

Présenté par :

-Mr. ZAIDI Tariq

Année Universitaire : 2013 / 2014

N° d'ordre : CSE-09

REMERCIEMENTS

*Je tiens, tout particulièrement, à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur monsieur **ZEGHLACHE Samir** enseignant à l'université de M'SILA, pour ces conseils précieux, ses directives enrichissantes, sa patience et sa disponibilité, ainsi que pour la confiance et l'aide qu'il m'a accordé pour mener ce travail à terme.*

Toutes mes reconnaissances vont également aux membres de jury.

Je remercie également tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

A qui puis-je dédier ce travail si ce n'est à mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et les encouragements sont le secret de ma réussite. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

Je dédie ce travail également

A mes très chers frères et sœur, et toute ma famille.

A tout mes enseignants, du primaire au niveau supérieur.

A mon cher encadreur Mr. ZEGHLACHE Samir.

A tout mes amis et mes collègues de département de génie électrique promotion 2014.

*«Dans un voyage, le plus long est d'arriver à la porte.»
Marcus Terentius Varro*



TABLE DES MATIERES

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I: Présentation De Simulateur D'hélicoptère TRMS	
I.1- Introduction	4
I.2- Présentation du simulateur	4
I.2.1 Propulseurs	5
I.2.2 Commande des moteurs	6
I.2.3 Les encodeurs optiques	6
I.2.4 La base du TRMS	6
I.2.5 Boîtier marche/arrêt	7
I.2.6 Le (SCSI BOX)	7
I.2.7 Carte d'acquisition	8
I.2.8 Environnement De Développement	9
I.3-Conclusion	12
CHAPITRE II : Modélisation Du Simulateur TRMS	
II.1 Introduction	14
II.2 Modèle non linéaire	14
II.2.1. Modélisation du système TRMS	15
II.2.1.a Sous système d'élévation.....	15
II.2.1.a.1 Moment Statique non linéaire	16
II.2.1.a.2 Moment de la gravitation	16
II.2.1.a.3 Moment gyroscopique	16
II.2.1.a.4 Moment de friction	16
II.2.1.b Sous système d'azimut	17
II.2.1.b.1 Moment Statique non linéaire	17
II.2.1.b.2 Moment de friction	17
II.2.1.b.3 Moment de réaction	17
II.3 Modèle d'état	18

II.3.1. Paramètres du modèle	19
II.3.2. Simulation	20
II.4. conclusion	22

CHAPITRE III : Commande Par la Logique Floue

III.1 Introduction	24
III.2 La logique floue	24
III.3 Les concepts	25
III.3.1 Sous-ensemble flou	26
III.3.2 Variable linguistique	27
III.3.3 Opérateurs de la logique floue	28
III.3.4 Fonction d'appartenance	29
III.3.5 Propositions et règle floue	30
III.4 Commande par logique floue	31
III.4.1 Introduction	31
III.4.2 Principe et réalisation d'un régulateur flou	32
III.4.2.1 Procédé générale lors de la conception d'une commande par logique floue.....	32
III.4.2.2 Propriétés d'une commande par logique floue	33
III.4.3 Structure d'un régulateur flou	34
III.4.3.1 Interface de fuzzification	34
III.4.3.2 Base de connaissances	36
III.4.3.3 Moteur d'inférence floue	36
III.4.3.3.1 Méthode d'inférence max-min	36
III.4.3.3.2 Méthode d'inférence max-prod	37
III.4.3.3.3 Méthode d'inférence somme-prod	38
III.4.3.4 Interface de défuzzification	38
III.4.4 Différents types de régulateurs flous	39
III.4.4.1 Régulateur de type Mamdani	39
III.4.4.2 Régulateur de type Sugeno	40
III.4.5 Principe du régulateur flou	41
III.4.5.1 Variables d'entrées du régulateur	41
III.4.6 Avantages et inconvénients de la commande par logique Floue.....	41
III.5 Conclusion	42

CHAPITRE IV : Simulation et résultats discussion

IV.I Introduction	44
IV.2. La commande linéaire.....	44
IV.2.1. Le contrôleur linéaire PID	45
IV.2.2. Simulation.....	46
IV.2.3. Interprétation des résultats.....	49
IV.3. Commande décentralisée par logique floue du système TRMS.....	49
IV.3.1. Introduction	49
IV.3.2. Commande floue décentralisée du système TRMS.....	49
IV.3.2.1. Structure de régulateur flou de MAMDANI	50
IV.3.2.2. Les gains de normalisation	52
IV.3.2.3. Simulation du régulateur flou	52
IV.3.2.4. Interprétation des résultats	58
IV.3.2.5. Test de poursuite d'une trajectoire en mode couplé (2 DDL) avec variation paramétrique	58
IV.3.2.6. Interprétation des résultats.....	59
IV.4. Conclusion	60
Conclusion générale.....	61
Références Bibliographiques	62

Introduction générale

Les méthodes classiques de l'automatique ont été largement appliquées dans de nombreux problèmes de régulation industrielle. Cependant, la plupart des systèmes physiques présentent des non linéarités et leurs paramètres sont souvent mal connus et/ou variables dans le temps. Pour la commande de telles classes de systèmes les méthodes conventionnelles de l'automatique ont montré leurs limites en termes de stabilisation et performances. Avec le développement des calculateurs numériques, les automaticiens commencent à s'intéresser aux nouvelles approches de commande telles que la commande adaptative, la commande prédictive, la commande robuste, ainsi que les techniques basées sur l'intelligence artificielle. Parmi ces dernières ; la commande par logique floue. Cette commande est à l'heure actuelle une des préoccupations des chercheurs dans le monde [1], [2], [3], [4]. Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'application de cette technique de commande par logique floue aux systèmes physiques.

Durant ces dernières décennies, l'utilisation de la théorie des ensembles flous dans la modélisation et la commande des systèmes complexes a connue une évolution considérable. En effet, le principe de la commande floue a été expérimenté pour la première fois en 1974 par l'équipe du professeur E.H. Mamdani [5]. Les résultats obtenus, ont été repris et développés par plusieurs équipes en Europe de l'Ouest. Puis ensuite par l'Institut de Technologie de Tokyo [6] et dans quelques autres universités japonaises. Depuis 1987, date à laquelle la première application " grand public" a vu le jour. Utilisant la logique floue, le métro de Sendai, a été mis sur le marché [7]. Depuis cette époque, l'utilisation des techniques de commande floue n'a cessé d'évoluer. Aujourd'hui, les différents travaux et publications récentes dans ce domaine semblent indiquer que les deux domaines d'application de la logique floue les plus importants sont :

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

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

Les avancées récentes en informatique et en électronique de puissance permettent la fabrication des systèmes prototypes, qui jouent le rôle de simulateurs réels miniatures. Ces derniers permettent de tester de nouvelles techniques de commande. Les systèmes comme le simple et le double pendule [8], ainsi que le simulateur de vol d'hélicoptère (Twin Rotor Mimo system) [9], sont de très bons exemples de ces prototypes réels. Ces derniers, sont caractérisés par des comportements physiques non-linéaires difficilement modélisables. Cette caractéristique a motivé les chercheurs pour les utiliser afin de valider et tester les lois de commande développées théoriquement. Le travail présenté dans ce mémoire, s'intègre dans cet objectif

Ce mémoire est composé de quatre chapitres, est organisé de la manière suivante:

- 1) Dans le premier chapitre nous allons faire une description générale sur le modèle que nous avons étudié appelé « *Twin Rotor Mimo Système TRMS* ».
- 2) Le second chapitre est consacré à l'identification analytique d'un type de système mécanique caractérisé par une dynamique non linéaire complexe ayant des interconnexions entre ses différentes variables. Ce système est le simulateur de vol d'hélicoptère (« *Twin Rotor MIMO System TRMS* »).
- 3) Le troisième chapitre est consacré à la théorie de la logique floue ainsi que son utilisation dans la commande des systèmes. Nous commençons par exposer les définitions de base sur les variables floues ainsi que les notions juste nécessaires pour les développements qui suivent. Le principe de la commande floue est ensuite abordé en présentant les différents types de régulateurs flous et en explicitant les éléments constitutifs de chaque type.
- 4) Le quatrième chapitre concerne à l'application de deux méthodes de commandes connus (PID et la commande floue), leur simulation, discussion et comparaison des résultats de simulation entre ces deux types de commande en fonction de robustesse et efficacité.

Nous terminons ainsi ce mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE I

I Présentation De Simulateur D'hélicoptère TRMS

I.1. Introduction

Les systèmes aéronautiques sont devenus aujourd'hui si difficiles et complexe qu'on ne puisse pas réaliser leurs commandes par des techniques classiques. En effet, des chercheurs automaticiens se sont penchés sur ces problèmes de commande, pour cela Plusieurs prototypes ont été réalisés dans le but de tester de nouvelles techniques de commande. Le simulateur d'hélicoptère (TRMS) est l'un de ces prototypes sur lequel nous allons travailler.

Dans Ce chapitre, nous présentons la plate forme réelle du système TRMS, nous expliquons le rôle principal de chaque élément dans ce système.

I.2. Présentation du simulateur

Le TRMS (Twin Rotor MIMO System) est un système physique aérodynamique fortement non-linéaire conçu pour le développement et l'implémentation de nouvelles lois de commandes [11]. Il se compose des éléments suivants (*figure I.1*) et (*figure I.2*):

- Une poutre qui peut pivoter sur sa base de telle manière qu'elle puisse tourner librement dans le plan vertical et horizontal,
- Deux propulseurs (principal et secondaire) fixés aux deux extrémités de la poutre, ils sont formés d'une hélice, un moteur à courant continu ainsi qu'un bouclier pour des raisons de sécurité,
- Un contre poids fixé sur la tige à son pivot, son rôle est de diminuer les vibrations (Oscillations) de la poutre,
- Une tour pour maintenir la poutre,
- Une base comprenant des circuits électroniques pour l'adaptation, la synchronisation et le filtrage des signaux entrants et sortants,
- Un boîtier de marche/arrêt des moteurs.

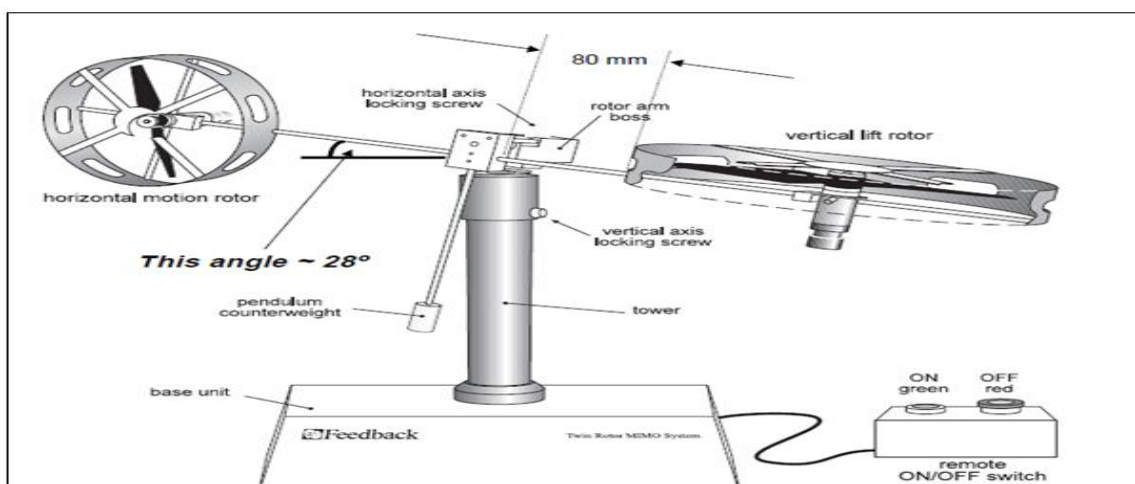


Figure I.1 : le simulateur d'hélicoptère TRMS [11]

Le modèle du TRMS est multi variable à deux entrées et deux sorties. Les sorties étant l'angle d'élévation et l'angle d'azimut, les entrées étant les tensions appliquées aux deux moteurs. L'articulation sphérique permet à la poutre de pivoter simultanément dans le plan horizontal et vertical, c'est un système à deux degrés de liberté, mais on peut restreindre le mouvement à un degré de liberté par de 2 vis.

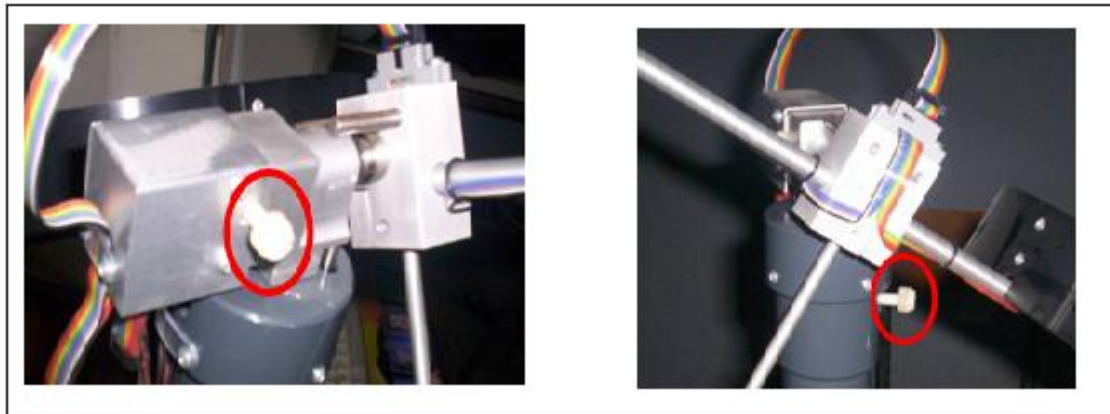


Figure I.2 : les deux vis de fixation [11]

L'objectif de commande est de faire pivoter la poutre autour des deux axes rapidement et avec précision, et cela en variant les forces aérodynamiques des deux propulseurs. Dans un hélicoptère normal la force aérodynamique est commandée en changeant l'angle d'attaque. Néanmoins dans le TRMS cet angle est fixé, et les forces aérodynamiques sont commandées en changeant la vitesse des propulseurs.

I.2.1. Propulseurs

Le TRMS possède deux propulseurs, un principal qui agit dans le plan vertical, et l'autre secondaire qui agit dans le plan horizontal. Chaque propulseur est composé d'une hélice. Ces derniers sont entraînés par des moteurs à courant continu (marque MAXON), couplés avec des tachymètres. La tension de commande varie entre $\pm 2.5V$, le signe de la tension indique le sens de rotation (figure I.3).

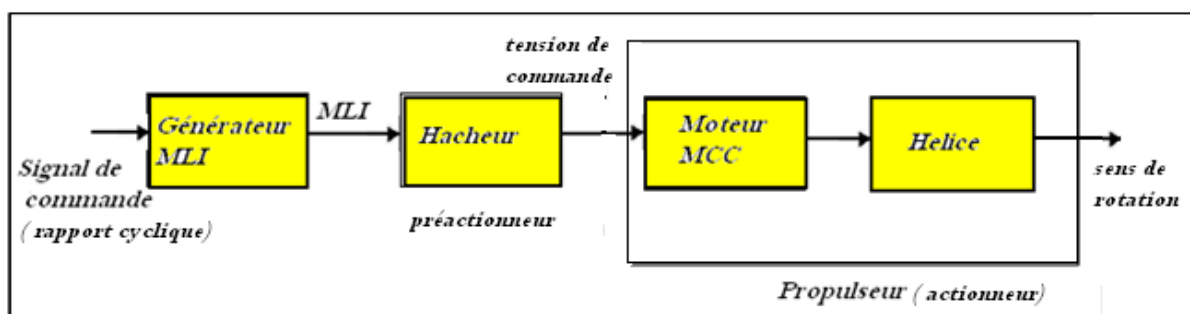


Figure I.3 : Schéma synoptique du fonctionnement du propulseur [11]

I.2.2. Commande des moteurs

Le principe des moteurs électriques à courant continu utilisés est que leurs vitesses de rotation sont proportionnelles à la tension qui leur est appliquée. Le mécanisme utilisé est un hacheur, qui est un convertisseur statique alimenté par une source de tension continue qui produit aux bornes du moteur une tension de valeur moyenne réglable. Ce hacheur est commandé par des trains d'impulsions (MLI) qui sont générés à partir du signal de commande provenant du PC à travers la carte d'acquisition (*figure I.3*).

I.2.3. Les encodeurs optiques

Le TRMS à deux capteurs pour mesurer l'orientation de la poutre dans l'espace, ils se situent à l'intérieur du pivot sphérique de la poutre. Il s'agit de deux encodeurs optiques incrémentaux : le principe de fonctionnement est le suivant (*figure I.4*).

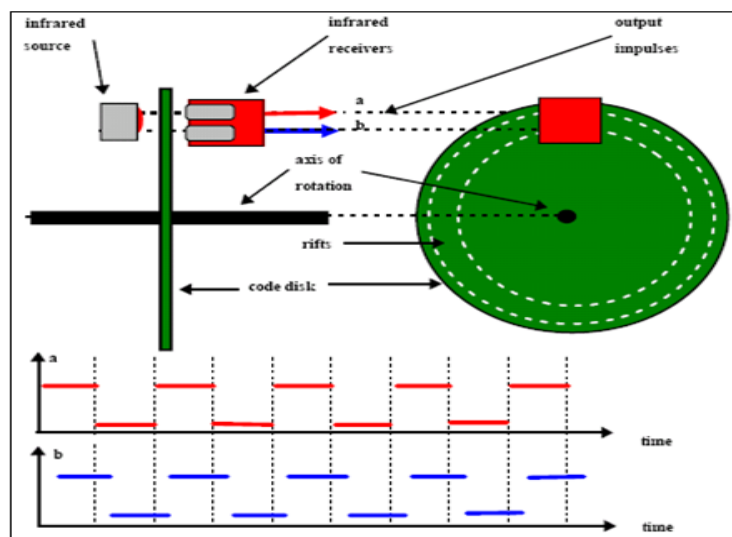


Figure I.4 : encodeurs optiques [11]

Les faisceaux lumineux émis par les deux photos diodes (A et B) passent par deux anneaux de fentes sur le disque. Les fentes ont une différence de phase, de sorte que la tension des récepteurs (A et B) soit des ondes rectangulaires avec une différence de phase. Le signe de la différence de phase permet de déterminer la direction de la rotation (+ : sens direct) et (- : sens inverse).

I.2.4. La base du TRMS

À l'arrière de la base on trouve les différents connecteurs (*figure I.5*):

- **Connecteur ON / Off** : Fiche DIN pour connecter la boîte de l'intercepteur ON/OFF des moteurs,
- **Sélecteur 110/220v**,
- **Fiche d'alimentation 110/220 V**

• **Connecteur CN1** : Il se branche avec le PL2 de la boîte d'adaptation, avec une large nappe 40 pistes. Les signaux sont ceux des deux capteurs de positions, c'est des signaux digitaux sur 16 bits,

• **Connecteur CN2** : Il se branche avec PL3, avec une nappe 20 pistes. Les signaux sont les tensions de commandes des deux moteurs.

Connecteur CN3 ; il se branche avec PL1, avec une nappe 20 pistes. Les signaux sont ceux des tachymètres

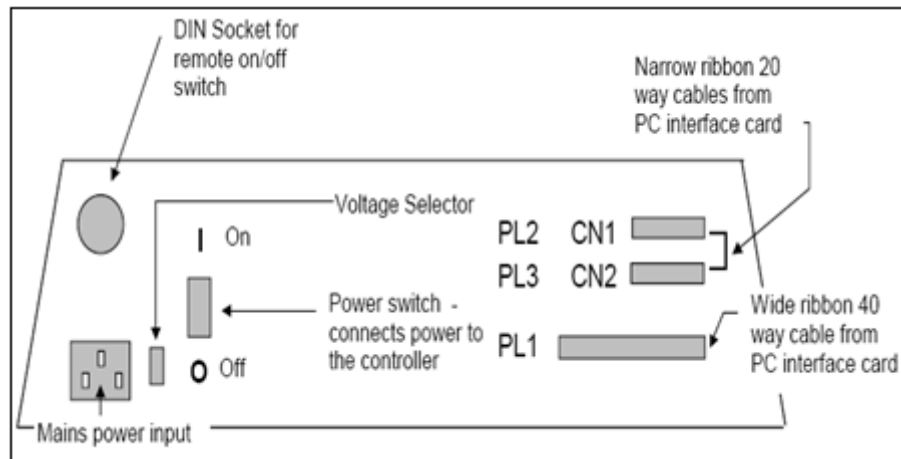


Figure I.5 : la base du TRMS [11]

I.2.5. Boîtier marche/arrêt

C'est un petit boîtier avec deux boutons poussoirs, l'un vert pour fermer le circuit d'amplification des moteurs, et l'autre rouge pour l'ouvrir et couper l'alimentation, son rôle principal est de protéger les moteurs en cas de mauvaise manœuvre par l'utilisateur. Il est connecté à l'arrière de la base du TRMS (figure I.1).

I.2.6. Le (SCSI BOX)

La (SCSI BOX) (figure I.6), a comme rôle d'adapter les signaux entre la carte d'acquisition et les différents connecteurs de la base du TRMS, et aussi séparer ces différents signaux en fonction de leurs types. Cette boîte dispose de quatre connecteurs :

- Un connecteur 68 pins pour connecter le câble global 68 pins SCSI de la carte d'acquisition,
- Un grand connecteur PL1 pour les entrées digitales des capteurs de positions (deux encodeurs optiques),
- Un petit connecteur PL2 pour les sorties analogiques (deux tensions de commandes des moteurs),

- Un autre petit connecteur PL3 pour les entrées analogiques (retour tachymétrique des deux moteurs).

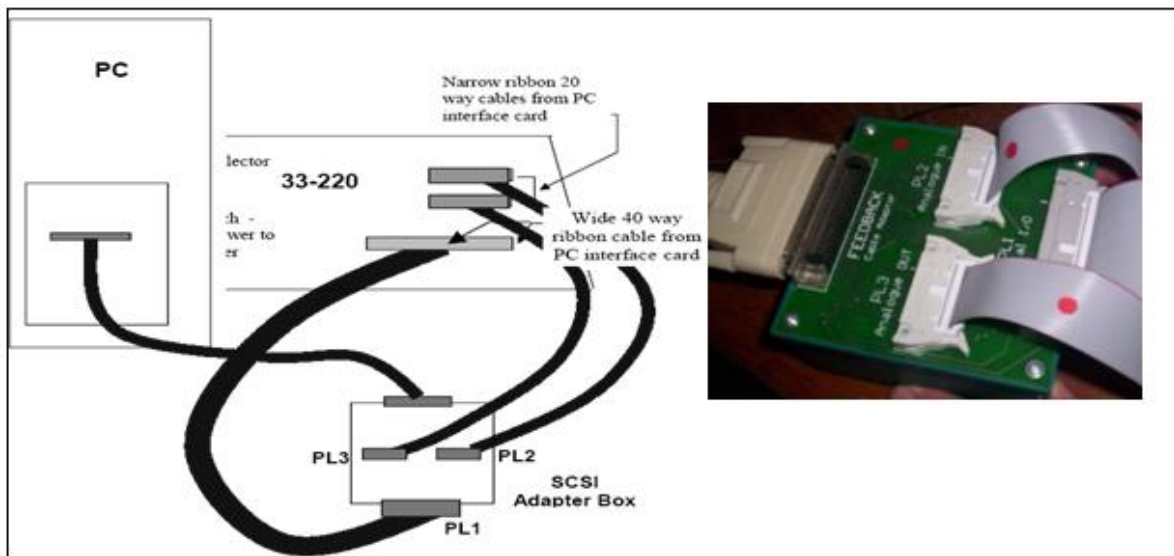


Figure I.6: branchement des différents connecteurs [11]

I.2.7. Carte d'acquisition ADVANTECH PCI 1711

C'est une carte d'acquisition universelle qui s'installe sur le port PCI du PC de commande et dispose de connecteurs extérieurs pour des entrées/sorties analogiques et digitaux. Ces principales caractéristiques sont :

- La fonction Plug & play,
- 16 entrées analogiques configurables 16 simples (single-ended) ou source flottante,
- Convertisseurs A/D industriels normalisés à approximations successives,
- 12 bits utilisés pour la conversion des entrées analogiques,
- La fréquence maximale d'échantillonnage est de 100KHz,
- Gammes des entrées analogiques est programmable et contrôlable par software,
- Chaque canal à sa gamme individuelle stockée dans la RAM de la carte,
- Deux sorties analogiques (convertisseur D/A),
- 16 canaux d'entées digitales,
- 16 canaux de sorties digitales,
- Un compteur/timer programmable,
- Scanne automatique des gains/canaux,

Son principal rôle dans notre application, est qu'elle permet la commande digitale d'un système continu à travers un PC, en convertissant les signaux analogiques en numériques et vice-versa. Dans notre cas, nous avons utilisé :

- Deux sorties analogiques (convertisseur D/A) pour délivrer les tensions de commandes de références,
- Les entrées digitales des deux encodeurs optiques pour mesurer l'angle d'élévation et d'azimut de la poutre,
- Deux entrées analogiques (convertisseur A/D) pour récupérer le retour tachymétrique des deux moteurs.

I.2.8. Environnement de Développement

Ce banc d'essai utilise une approche novatrice d'implémentation, qui jouit d'une flexibilité accrue et d'une architecture totalement ouverte, cette approche est appelée HIL pour « **Hardware-In the-Loop** ». Ou bien « **Rapid Prototyping** ».

Cette approche élimine l'étape entre la synthèse du régulateur en simulation, et son implémentation réelle sur un système embarqué spécialisé. Cette dernière cause des pertes de temps considérables, en testant et en calibrant à nouveau le régulateur implémenté. Avec le « hardware-in the-loop », on teste directement le contrôleur qu'on a synthétisé en simulation sur le système physique réel, avec un simple PC de développement [11], [12].

En effet, tout ce qu'on a besoin est :

- un PC standard (pour le développement et pour la commande),
- une carte d'acquisition pour la conversion A/D et D/A,
- le système physique à commander,
- les logiciels nécessaires.

Les logiciels utilisés sont :

- **Matlab** : il joue le rôle d'une plate-forme, où tous les autres composants s'exécutent, c'est l'environnement le plus utilisé dans le monde par les ingénieurs, il fournit plusieurs routines sophistiquées de calculs numériques.
- **Simulink** : C'est un langage de haut niveau graphique, avec lequel on programme avec des objets ou blocks, ces objets peuvent être soit des blocks standards ou des blocks spécialisés écrits par l'utilisateur comme des S-fonctions.
- **Real Time Workshop (RTW)** : c'est le programme le plus important, il génère automatiquement du code source C++ optimisé, à partir du modèle simulink. De plus, ce code est paramétrable pour plusieurs targets (cible) d'implémentation. Dans notre cas le target est un processeur Pentium sous WINDOWS comme système d'exploitation.

- **Compilateur C++** : il compile le code généré par real time workshop et fait l'édition des liens pour générer un exécutable qui communique avec la cible d'implémentation (target), dans notre cas, le compilateur est VISUAL C++ 6.0 PRO.
 - **Real Time Windows Target** : Dans le cas d'un environnement WINDOWS, ce petit kernel (noyau), est essentiel, son rôle est primordial, il assure le temps réel pour notre régulateur. Car WINDOWS est un OS événementiel donc il n'est pas temps réel. Il s'exécute comme un service réside dans le niveau zéro (mode noyau) et intercepte les interruptions matérielles avant WINDOWS, ensuite, Il communique avec l'exécutable du régulateur et interface avec le système physique à travers la carte d'acquisition. Il contrôle donc le flux de données et de signaux du modèle (maintenant exécutable) vers le système physique et vice versa.
- On a besoin aussi, des bibliothèques, ou drivers de la carte d'acquisition, pour les intégrer dans notre programme. Voici ci-dessus un schéma (figure I.7) qui illustre la relation qui existe entre les différents modules :

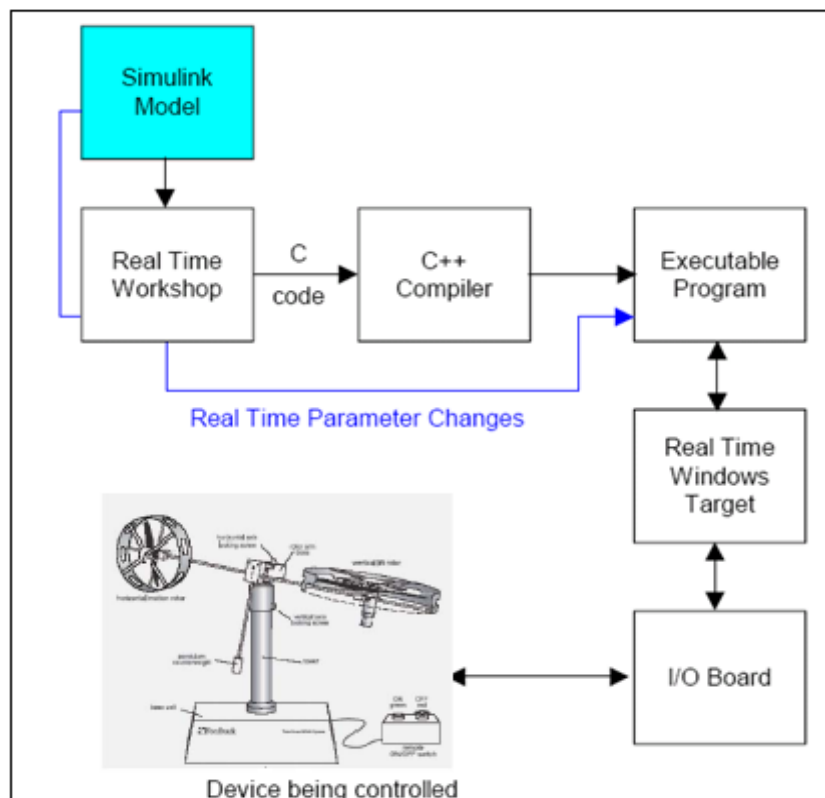


Figure I.7 : Processus de génération du code exécutable, [11]

Pour passer d'un régulateur simulé vers un programme temps réel, il suffit juste d'ajouter dans le modèle de simulation sous SIMULINK, les différents blocs des entrées /sorties de la carte d'acquisition (ANALOG INPUT, ANALOG OUTPUT, ENCODER CHANNEL ...etc.)

Pour notre carte d'acquisition voici la librairie utilisée :

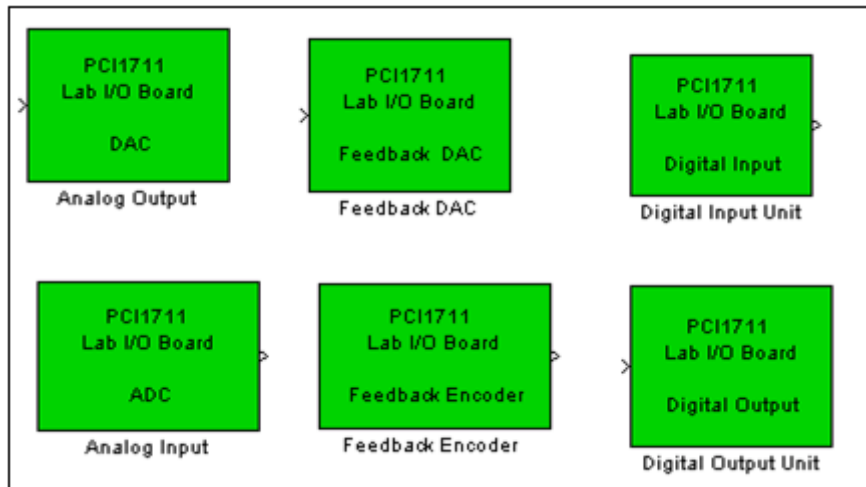


Figure 1.8: Librairie de la carte d'acquisition, [11]

Et voici ci-dessous un exemple complet de commande en temps réel avec MATLAB :

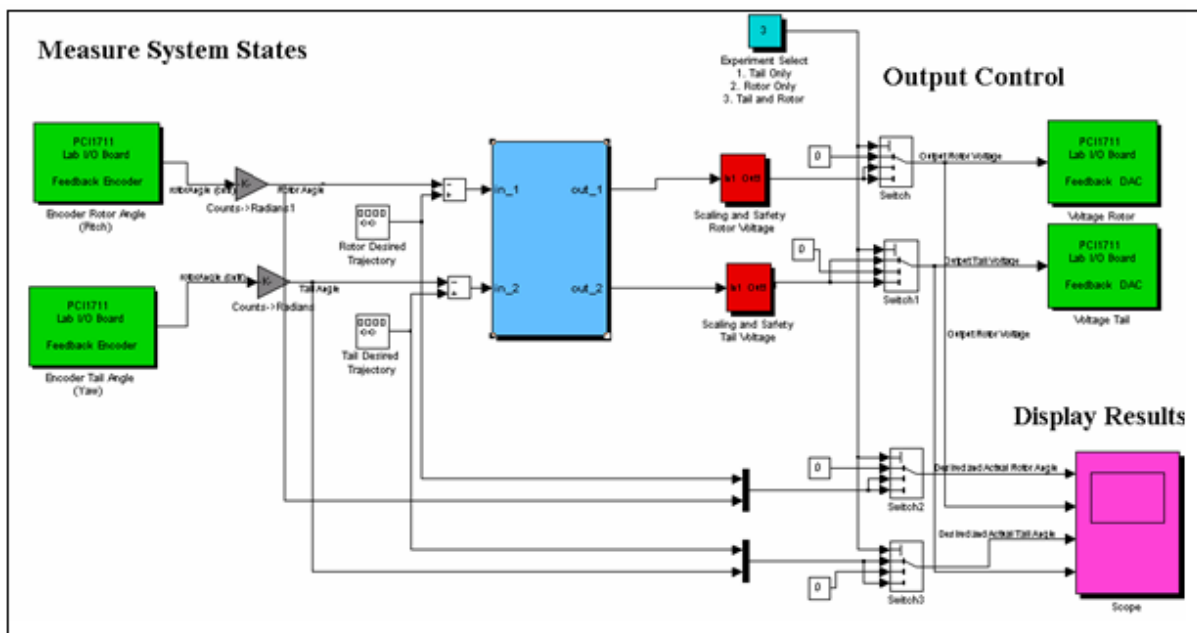


Figure 1.9 : Exemple d'implémentation d'un contrôleur, [12]

- **En vert** : blocs de communications avec la carte d'acquisition, à gauche les encodeurs et à droite des sorties analogiques (tension de commande).
- **En rouge** : blocs de protection des moteurs, car la tension max est de $\pm 2.5 V$.
- **En gris** : blocs de conversion, car les encodeurs incrémentaux donnent le nombre d'impulsions qu'il faut convertir en radian.

- **En bleu** : est la partie essentielle qui est le bloc de notre régulateur. Ce bloc peut être écrit par n'importe quel langage, on peut même importer un régulateur déjà écrit et l'implémenté, grâce à l'architecture ouverte de cette approche.

Après compilation du programme, il sera indépendant de MATLAB et SIMULINK, néanmoins, on peut utiliser juste SIMULINK comme interface homme machine, pour visualiser et récupérer les signaux.

I.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une présentation détaillée de la plate forme réelle du système TRMS de point de vue software ainsi que hardware, en explicitant les caractéristiques ainsi que le rôle de chaque élément de ce système. Enfin, nous avons expliqué l'environnement de développement utilisé. Le chapitre suivant fait l'objet de la modélisation du TRMS.

CHAPITRE II

II Modélisation Du Simulateur TRMS

II.1. Introduction

Avec le progrès technologique des moyens de calcul numériques, la stabilisation des systèmes aéronautiques constitue à l'heure actuelle un axe de recherche et de développement très privilégié. En effet, les chercheurs automaticiens se sont penchés durant ces dernières décennies sur les problèmes de commande liés à ce type de systèmes [44], [20], [21] Pour des raisons de sécurité et de coût élevé, il est clair que les lois de commande développées ne peuvent être appliquées sur le système réel. En effet, des plates formes d'expérimentation ont été conçues afin de permettre de les tester sur des prototypes. Parmi ces systèmes, on trouve le simulateur de vol d'hélicoptère. Ce système électromécanique reflète le comportement dynamique de l'hélicoptère réel. C'est un système multivariable et couplé. Le présent chapitre est consacré à la modélisation de ce système.

II.2. Modèle non linéaire

Le modèle physique est développé sous certaines hypothèses simplificatrices. En premier lieu, on suppose que les dynamiques du sous-système rotor sont des équations différentielles du premier ordre. De plus, on suppose que les frottements sont de type visqueux, et que le sous-système hélice-air peut être décrit par les lois d'écoulement aérodynamiques [13].

Le TRMS (Twin Rotor MIMO System) est un système physique aérodynamique conçu pour le développement et l'implémentation de nouvelles lois de commandes. Ceci inclut, la modélisation de la dynamique du système, l'identification, l'analyse et la conception de divers contrôleurs par des méthodes classiques et modernes. Son comportement ressemble à celui d'un hélicoptère réel. De point de vue commande, il présente un système non linéaire multi variable fortement couplé [13].

La (figure II.1) illustre la photographie du système TRMS :

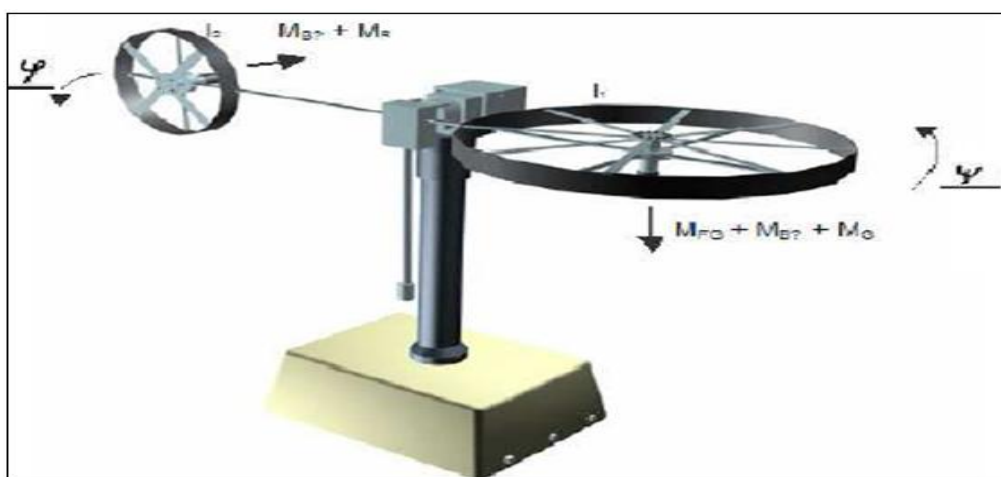


Figure II.1 le simulateur TRMS" twin rotor mimo system" [13]

II.2.1. Modélisation du système TRMS

Plusieurs travaux ont été réalisés, dont le but est de modéliser et identifier le système TRMS [1], [9], [35], [30]. Dans notre présent travail, et afin de développer un modèle dynamique pour le simulateur d'hélicoptère, nous avons utilisé une méthode directe basée sur le calcul des forces agissant sur le corps du simulateur. Le développement de ce modèle sera fait sous les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les dynamiques du sous-système du rotor sont des équations différentielles du premier ordre,
- Les frottements sont de type visqueux,
- Le sous-système hélice air peut être décrit par les lois d'écoulement.

II.2.1.a Sous système d'élévation

Initialement, nous considérons la rotation de la tige dans le plan vertical. C'est-à-dire autour de l'axe horizontal. On considère que les couples moteurs sont générés par les hélices. La rotation peut être assimilée au principe du mouvement du pendule.

En appliquant la seconde loi de Newton on obtient :

$$M_v = I_1 \frac{d\alpha_v^2}{dt^2} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$$M_v = \sum_{i=1}^4 M_{vi} \quad (\text{II.2})$$

L'équation dans le plan vertical peut être écrite sous la forme :

$$I_1 \ddot{\psi} = M_1 - M_{FG} - M_{B\psi} - M_G \quad (\text{II.3})$$

Où :

M_1 : Caractéristique statique non linéaire dans le plan vertical.

I_1 : Moments d'inertie par rapport à l'axe horizontal

ψ : L'angle d'élévation de la tige

M_{FG} : Moment de la gravitation

M_G : Moment gyroscopique

$M_{B\psi}$: *Moment de friction*

II.2.1.a.1 Moment Statique non linéaire

$$M_1 = a_1 \tau_1^2 + b_1 \tau_1 \quad (\text{II.4})$$

Où:

τ_1 : *Moment du rotor principal.*

a_1 : *Paramètre caractéristique statique.*

b_1 : *Paramètre caractéristique statique.*

II.2.1.a.2 Moment de la gravitation

$$M_{FG} = M_g \sin \psi \quad (\text{II.5})$$

M_g : *Moment gravitationnel.*

II.2.1.a.3 Moment gyroscopique

$$M_G = k_{gy} M_1 \dot{\phi} \cos \psi \quad (\text{II.6})$$

k_{gy} : *Paramètre de moment gyroscopique.*

II.2.1.a.4 Moment de friction

$$M_{B\psi} = B_{1\psi} \dot{\psi} - \frac{0.0326}{2} \sin 2\psi \dot{\phi}^2 \quad (\text{II.7})$$

$B_{1\psi}$: *Paramètre de la fonction de moment de friction.*

Le moteur à CC et le circuit de contrôle électrique dans le domaine de Laplace est donné par :

$$\tau_1 = \frac{k_1}{T_{11}s + T_{10}} u_1 \quad (\text{II.8})$$

k_1 : *Gain de DC moteur.*

T_{10} : *Paramètre dominateur de DC moteur.*

T_{11} : *Paramètre dominateur de DC moteur.*

u_1 : *Commande de plan vertical.*

II.2.1.b Sous système d'azimut

De la même façon, on peut décrire le mouvement de la tige autour de l'axe vertical, le mouvement horizontal peut être décrit comme étant un mouvement de rotation d'un solide :

$$I_2 \ddot{\varphi} = M_2 - M_{B\varphi} - M_R \quad (\text{II.9})$$

I_2 : Moments d'inertie par rapport à l'axe vertical.

φ : L'angle d'azimut.

M_2 : Caractéristique statique non linéaire.

$M_{B\varphi}$: Moment de friction.

M_R : Moment de réaction.

II.2.1.b.1 Moment Statique non linéaire

$$M_2 = a_2 \tau_2^2 + b_2 \tau_2 \quad (\text{II.10})$$

a_2 : Paramètre caractéristique statique.

τ_2 : Moment du rotor secondaire.

b_2 : Paramètre caractéristique statique.

II.2.1.b.2 Moment de friction

$$M_{B\varphi} = B_{1\varphi} \dot{\varphi} \quad (\text{II.11})$$

$B_{1\varphi}$: Paramètre de la fonction de moment de friction.

II.2.1.b.3 Moment de réaction

Son fonction de transfert de premier ordre est :

$$M_R = \frac{k_c (T_0 S + 1)}{T_p S + 1} M_1 \quad (\text{II.12})$$

k_c : Gain de moment de réaction.

T_0 : Paramètre de moment de réaction.

T_p : Paramètre de moment de réaction.

Ensuite la fonction transfert de la DC moteur est donné par :

$$\tau_2 = \frac{k_2}{T_{21}S + T_{20}} u_2 \quad (\text{II.13})$$

k_2 : Gain de DC moteur.

T_{21} : Paramètre dominateur de DC moteur.

T_{20} : Paramètre dominateur de DC moteur.

u_2 : Commande de plan horizontal.

II.3. Modèle d'état

En peut utilisant les équations précédentes, pour écrire les équations décrivant le mouvement du système comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \psi = \dot{\psi} \\ \frac{d}{dt} \dot{\psi} = \frac{a_1}{I_1} \tau_1^2 + \frac{b_1}{I_1} \tau_1 - \frac{Mg}{I_1} \sin \psi + \frac{0.0326}{2I_1} \sin(2\psi) \dot{\phi}^2 - \frac{B_{1\psi}}{I_1} \dot{\psi} + \frac{k_{gy}}{I_1} a_1 \cos(\psi) \dot{\phi} \tau_1^2 - \frac{k_{gy}}{I_1} b_1 \cos(\psi) \dot{\phi} \tau_1 \\ \frac{d}{dt} \phi = \dot{\phi} \\ \frac{d}{dt} \dot{\phi} = \frac{a_2}{I_2} \tau_2^2 + \frac{b_2}{I_2} \tau_2 - \frac{B_{1\phi}}{I_2} \dot{\phi} - \frac{1.75}{I_2} k_c a_1 \tau_1^2 - \frac{1.75}{I_2} k_c b_1 \tau_1 \\ \frac{d}{dt} \tau_1 = -\frac{T_{10}}{T_{11}} \tau_1 + \frac{k_1}{T_{11}} u_1 \\ \frac{d}{dt} \tau_2 = -\frac{T_{20}}{T_{21}} \tau_2 + \frac{k_2}{T_{21}} u_2 \end{array} \right. \quad (\text{II.14})$$

On peut représenter le système TRMS dans l'espace d'état par l'équation non linéaire :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + B(u) \\ y &= C(x) \end{aligned}$$

Telle que : $x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, y \in \mathbb{R}^p, A \in \mathbb{R}^{n \times n}, C \in \mathbb{R}^{n \times p}$

Et on choisissant comme :

Entrée : $U = [u_1 u_2]^T$

Vecteur d'état : $X = [\psi \dot{\psi} \phi \dot{\phi} \tau_1 \tau_2]^T$

Sortie : $y = [\psi \phi]^T$

On obtient le modèle d'état ci-dessous :

$$\begin{cases}
 \frac{d}{dt}x_1 = \dot{x}_2 \\
 \frac{d}{dt}\dot{x}_2 = \frac{a_1}{I_1}x_5^2 + \frac{b_1}{I_1}x_5 - \frac{Mg}{I_1}\sin x_1 + \frac{0.0326}{2I_1}\sin(2x_1)x_4^2 - \frac{B_{1\psi}}{I_1}x_2 + \frac{k_{gy}}{I_1}a_1\cos(x_1)x_4x_5^2 - \frac{k_{gy}}{I_1}b_1\cos(x_1)x_4x_5 \\
 \frac{d}{dt}x_3 = \dot{x}_4 \\
 \frac{d}{dt}\dot{x}_4 = \frac{a_2}{I_2}x_6^2 + \frac{b_2}{I_2}x_6 - \frac{B_{1\phi}}{I_2}x_4 - \frac{1.75}{I_2}k_c a_1x_5^2 - \frac{1.75}{I_2}k_c b_1x_5 \\
 \frac{d}{dt}x_5 = -\frac{T_{10}}{T_{11}}x_5 + \frac{k_1}{T_{11}}u_1 \\
 \frac{d}{dt}x_6 = -\frac{T_{20}}{T_{21}}x_6 + \frac{k_2}{T_{21}}u_2
 \end{cases} \tag{II.15}$$

Le système TRMS est un système multi entrées multi sorties, la (figure II.5) présente un schéma simplificateur de ce système :

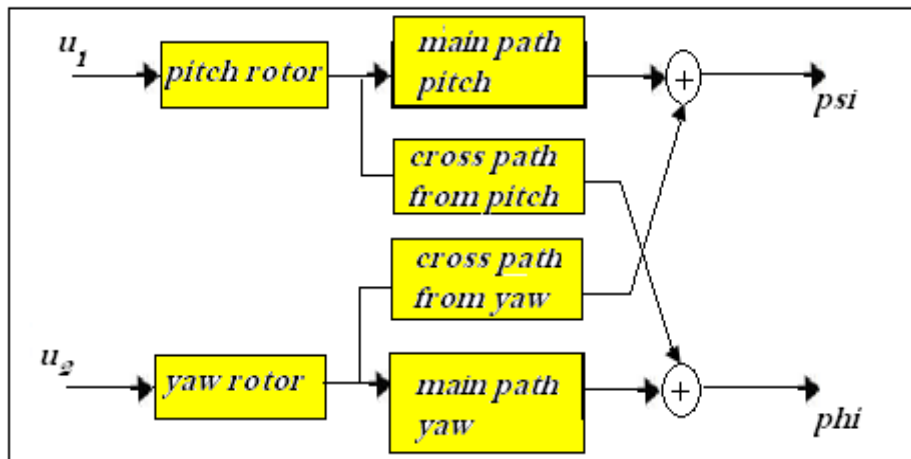


Figure II.5 : Schéma bloc du TRMS [13]

Ce système est contrôlé par deux entrées u_1 et u_2 . Ce système fournit un ordre élevé, le système est non linéaire avec un couplage croisé significatif. Les parties principales du système sont le socle, le bras relié au socle et deux hélices au niveau des extrémités de la flèche.

II.3.1. Paramètres du modèle

Pour simuler les modèles précédents, on doit d'abord déterminer les paramètres du modèle, qu'on peut les classer en trois catégories :

- Paramètres physiques.
- Caractéristiques non linéaires.
- Les constantes de temps et les gains statiques.

<i>Paramètre</i>	<i>Valeur numérique</i>
<i>I_1: Moments d'inertie par rapport à l'axe horizontal.</i>	<i>6.8. e-2 kg.m²</i>
<i>I_2: Moments d'inertie par rapport à l'axe vertical.</i>	<i>2. e-2 kg.m²</i>
<i>a_1: Paramètre caractéristique statique.</i>	<i>0.0135</i>
<i>b_1: Paramètre caractéristique statique.</i>	<i>0.0924</i>
<i>a_2: Paramètre caractéristique statique.</i>	<i>0.02</i>
<i>b_2: Paramètre caractéristique statique.</i>	<i>0.09</i>
<i>M_g: Moment gravitationnel.</i>	<i>0.32 N.m</i>
<i>$B_{1\psi}$: Paramètre de la fonction de moment de friction.</i>	<i>6. e-3 N.m.s/rad</i>
<i>$B_{2\psi}$: Paramètre de la fonction de moment de friction.</i>	<i>1. e-3 N.m.s²/rad</i>
<i>$B_{1\varphi}$: Paramètre de la fonction de moment de friction.</i>	<i>1. e-1 N.m.s/rad</i>
<i>$B_{2\varphi}$: Paramètre de la fonction de moment de friction.</i>	<i>1. e-2 N.m.s²/rad</i>
<i>k_{gy}: Paramètre de moment gyroscopique.</i>	<i>0.05 s/rad</i>
<i>k_1: Gain de DC moteur1.</i>	<i>1.1</i>
<i>k_2: Gain de DC moteur2.</i>	<i>0.8</i>
<i>T_{10}: Paramètre dominateur de DC moteur1.</i>	<i>1.1</i>
<i>T_{11}: Paramètre dominateur de DC moteur1.</i>	<i>1</i>
<i>T_{21}: Paramètre dominateur de DC moteur2.</i>	<i>1</i>
<i>T_{20}: Paramètre dominateur de DC moteur2.</i>	<i>1</i>
<i>T_p: Paramètre de moment de réaction.</i>	<i>2</i>
<i>T_0: Paramètre de moment de réaction.</i>	<i>3.5</i>
<i>k_c: Gain de moment de réaction.</i>	<i>-2</i>

Tableau II.1 : paramètres du modèle [13]

II.3.2. Simulation

Des essais libres (sans commande) ont été fait sur le modèle couplé, cela revient à laisser l'hélicoptère à l'état libre, il prendra ainsi une position d'équilibre illustrée sur la figure suivante :

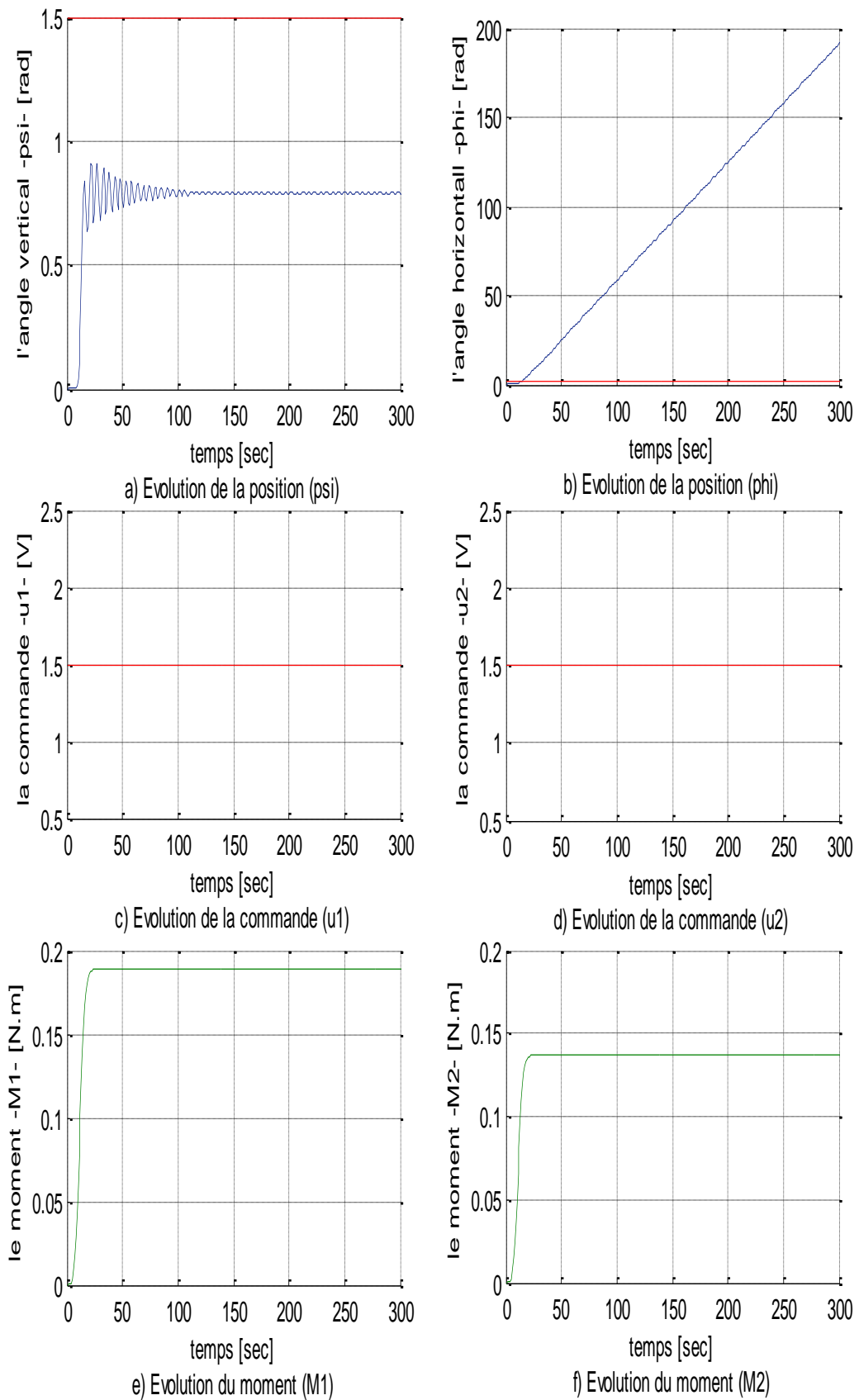


Figure II.4. Réponse libre avec $u1=u2=1.5$ et $\psi = \phi = 0$

On remarque que la réponse du sous système vertical est oscillatoire, ceci est dû aux forces gravitationnelles, et est amortie à cause des forces de frictions existant dans notre système.

II.4. conclusion

Ce chapitre nous à conduit à une modélisation analytique du simulateur d'hélicoptère, le modèle obtenu est non linéaire et fortement couplé, ce qui nous a poussé à procéder au découplage en deux sous systèmes, selon les deux plans (vertical et horizontal), car comme il a été introduit dans ce chapitre, le chapitre suivant est consacré à la présentation des généralité sur la logique floue.

CHAPITRE III

III Commande Par La Logique Floue.

III.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les notions principales de théorie de la logique floue, ainsi que de la commande floue. D'abord, nous présentons quelques concepts de base de la logique floue ainsi que leurs applications pour la synthèse d'une commande floue. Les éléments de bases d'un régulateur par logique flou, les différents types de régulateurs flous, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients seront donnés.

III.2. La logique floue

Les compréhensions de l'univers dans lequel nous évoluons sont généralement imparfaites dans la mesure où elles peuvent être entachées d'incertitudes et/ou d'imprécisions, ne serait-ce qu'à travers la perception que nous en avons. Or, nous pouvons constater que l'homme intègre naturellement ces imperfections dans la vie de tous les jours, en particulier au niveau du raisonnement et de la décision. L'idée du professeur Lotfi A.Zadeh [45], en 1965, à travers le nouveau concept ensembliste d'appartenance graduelle d'un élément à un ensemble, a été de définir une logique multi évaluée permettant de modéliser ces imperfections c'est prendre en compte les états intermédiaires entre le tout et le rien. L'utilité de cette approche peut être illustrée de la manière suivante :

Une température de 10°C, pour un humain, est généralement considérée comme froide; une autre de 40°C est qualifiée de chaude. Si chacune de ces valeurs appartient à une catégorie (ensemble) bien définie, qu'en est-il pour des valeurs intermédiaires? Une réponse intuitive consiste à affirmer qu'elles appartiennent à une ou deux des catégories précédentes avec des niveaux ou des degrés (normalisés) différents. On évite ainsi des transitions brusques entre différentes catégories, comme cela est le cas en logique binaire (*figure III.1*). Il semble en effet surprenant de considérer qu'une température de 40°C est chaude, alors qu'une température de 39,9°C ne l'est pas.

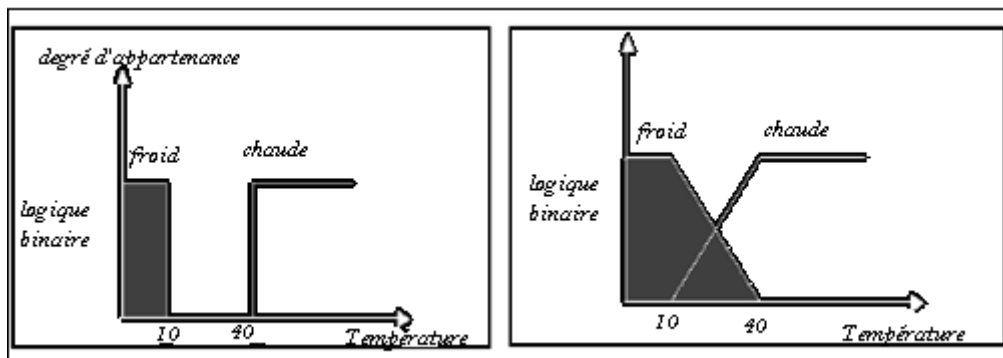


Figure III.1 : Exemple de définition d'ensembles sur un univers de discours en logique binaire et en logique floue

Cet exemple permet d'illustrer le fait qu'une logique binaire classique soit, dans certains cas, trop limitative. Donc il est nécessaire de faire appel à une autre logique multi évaluée qui sera vue comme une extension de la précédente, c'est bien la logique floue. En ce qui concerne la commande d'un processus quelconque, la logique floue permet une approche fondatrice par rapport à l'automatique classique. En automatique, en général, on s'attache à modéliser le processus à travers un certain nombre d'équations différentielles. Cette modélisation est rendue difficile et par fois impossible à mesurer que la complexité des processus à contrôler augmentent. D'une manière radicalement opposée, un contrôleur va décrire non pas le processus mais la façon de le contrôler, tout comme le ferait un expert humain à travers des règles intégrant naturellement imprécisions et incertitudes.

Un certain nombre d'applications utilisant la logique floue ont vu le jour ces dernières années. Les plus médiatisées sont certainement les réalisations des chercheurs et industriels japonais qui, depuis les années 80, se sont intéressés notamment au contrôle/commande de processus. Ces applications s'appuient sur les travaux de Mamdani [28], [29] qui fut certainement le premier à voir la potentialité de la théorie des sous-ensembles flous dans ce domaine. Nous pouvons citer autres dans des domaines généraux, tels que le marketing, les traitements médicaux, le domaine de traitement de l'image, le traitement de signal, la robotique, est autres.

III.3. Les concepts

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

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

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

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

Par extension, ce nouveau concept définit une logique multi évaluée qui apparaît comme une généralisation de la logique binaire. Nous allons maintenant définir un certain nombre de

termes propres au domaine de la logique floue auxquels nous pourrions nous référer [23], [24], [7], [33].

III.3.1. Sous-ensemble flou

Nous venons de voir ce que l'on entend par sous-ensemble ou, d'un point de vue formel. Un sous-ensemble A sur un univers de discours U , est représenté comme dans la (figure III.2) à travers sa fonction caractéristique μ_A . Il peut également être décrit par un certain nombre de caractéristiques comme:

• *son support* :

$$\text{Support}(A) = \{x \in U / \mu_A(x) \neq 0\} \quad (\text{III.1})$$

• *sa hauteur* :

$$\text{hauteur}(A) = \sup \{ \mu_A(x) \} \quad (\text{III.2})$$

• *son noyau* :

$$\text{noyau}(A) = \{x \in U / \mu_A(x) = 1\} \quad (\text{III.3})$$

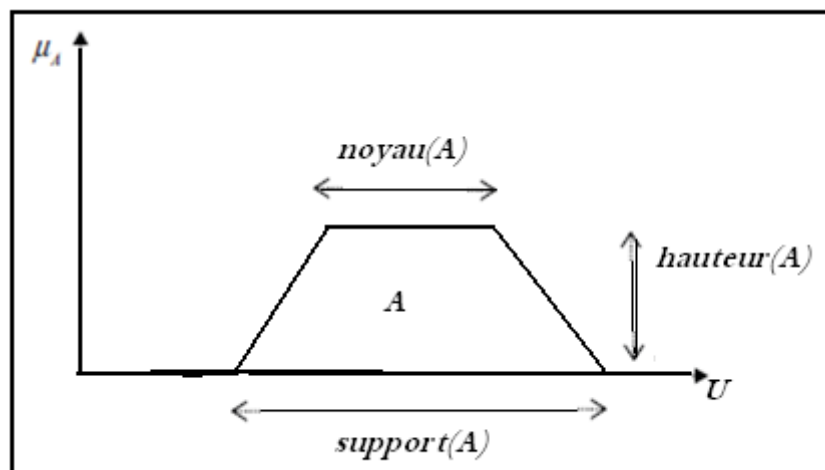


Figure III.2 : Représentation d'un sous-ensemble flou et principales caractéristiques

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

La notion de sous-ensemble flou permet de traiter :

- des catégories aux limites mal définies (comme « centre ville » ou « ancien »),
- des situations intermédiaires entre le tout et le rien (« presque noir »),

- le passage progressif d'une propriété à une autre (de « proche » à « éloigné » selon la distance),
- des valeurs approximatives (« environ 2 km »),
- des classes en évitant l'utilisation arbitraire de limites rigides (il est difficile de dire qu'une maison située à 200 m de la plage en est proche, mais qu'à 210 m elle en est éloignée).

Remarque :

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

III.3.2. Variable linguistique

Une variable linguistique sert à modéliser les connaissances imprécises ou vagues sur une variable dont la valeur précise peut être inconnue. Elle est définie par un triplet $(V; U; T_V)$ où V représente une variable classique (âge, température, . . .) définie sur l'univers de discours U . T_V est l'ensemble des instanciations possibles de la variable V : Il s'agit de sous-ensembles flous repérés par leur label A : on écrit ainsi $T_V = \{A_1; A_2; K; A_n\}$.

Graphiquement, une variable linguistique peut être représentée comme dans la (figure III.3).

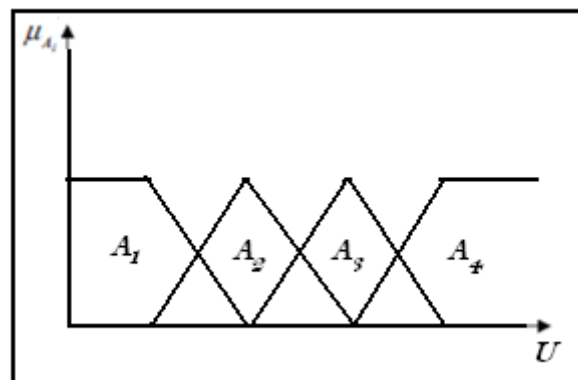


Figure III.3 : Représentation d'une variable linguistique définie comme

$$\{U, V, T_V = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}\}$$

Un sous-ensemble flou permet de représenter différentes notions, en particulier la spécificité et la précision. Ces différentes notions apparaissent dans la (figure III.4)

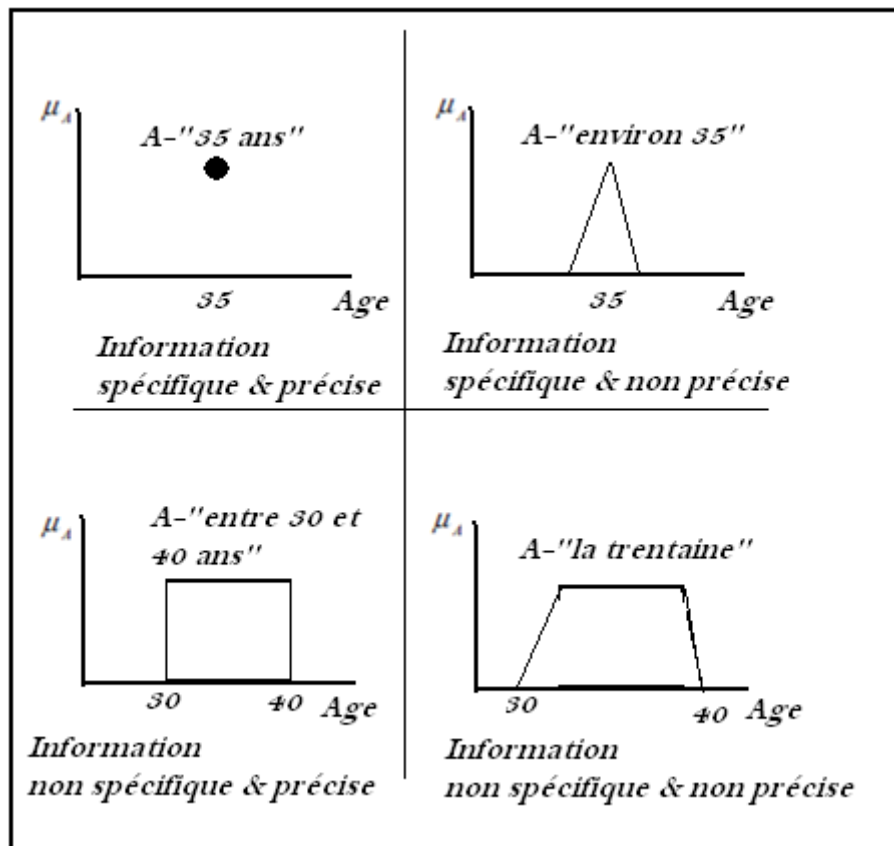


Figure III.4 : Notions de spécificité et de précision représentées à l'aide de sous-ensembles flous

III.3.3. Opérateurs de la logique floue

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

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

Soit A et B deux ensembles flous définissent dans le référentiel U avec les fonctions d'appartenances μ_A et μ_B respectivement :

- **Définition 1 :** (Union) La fonction d'appartenance $\mu_{A \cup B}$ de l'union $A \cup B$, est définis pour tout $u \in U$ par :

$$\mu_{A \cup B}(u) = \mu_A(u) + \mu_B(u) \tag{III.4}$$

Dans le domaine de la commande, le + représente souvent le MAX

$$\mu_A(u) + \mu_B(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \tag{III.5}$$

- **Définition 2 :** (intersection) La fonction d'appartenance $\mu_{A \cap B}$ de l'intersection

$A \cap B$, est définie pour tout $u \in U$ par :

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (\text{III.6})$$

- **Définition 3 :** (Complémentation) La fonction d'appartenance μ_{A^-} du complément de l'ensemble A, notée \bar{A} , est définie pour tout $u \in U$ par :

$$\mu_{A^-}(u) = 1 - \mu_A(u) \quad (\text{III.7})$$

- **Définition 4 :** (produit cartésien) soit A_1, \dots, A_n des ensembles flous respectivement définis sur U_1, \dots, U_n , le produit cartésien de A_1, \dots, A_n , est un ensemble flou défini sur U_1, \dots, U_n , de fonction d'appartenance :

$$\mu_{A_1 \times \dots \times A_n}(u_1, u_2, \dots, u_n) = \min(\mu_{A_1}(u_1), \dots, \mu_{A_n}(u_n)) = \mu_{A_1}(u_1) \cdot \mu_{A_2}(u_2) \cdot \dots \cdot \mu_{A_n}(u_n) \quad (\text{III.8})$$

- **Définition 5 :** (Relation floue) Une relation floue représente le degré de présence, ou d'absence d'une association entre les éléments de deux ou plusieurs ensembles flous. Une relation floue d'ordre n est un ensemble flou défini sur $U_1 \times \dots \times U_n$ par l'expression suivante :

$$R_{U_1 \times K \times U} = \{(u_1, K, u_n) * \mu_S(u_1, K, u_n) / (u_1, K, u_n) \in U_1 \times K \times U_n\} \quad (\text{III.9})$$

- **Définition 6 :** (Composition des règles floues) Soit R et S deux relations floues définies respectivement dans $U \times V$ et $V \times W$. La composition de R et S est un ensemble flou, symbolisé par $R \circ S$, de fonction d'appartenance :

$$\mu_{R \circ S}(u, w) = \left[(u, w) \text{ SUP}_v (\mu_R(u, v) * \mu_S(v, w)) \right] u \in U, v \in V, w \in W \quad (\text{III.10})$$

III.3.4. Fonction d'appartenance

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

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

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (\text{III.11})$$

- **Fonction trapézoïdale :** Elle est définie par quatre paramètres {a, b, c, d} :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{c-d}\right), 0\right) \quad (\text{III.12})$$

- **Fonction gaussienne** : Elle est définie par deux paramètres $\{ \sigma, m \}$:

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\text{III.13})$$

- **Fonction sigmoïdale** : Elle est définie par deux paramètres $\{ a, c \}$:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a - (x - c))} \quad (\text{III.14})$$

III.3.5. Propositions et règle floue

Une *proposition floue élémentaire* est définie à partir d'une variable linguistique $(V; U; T_v)$ par la qualification «*V est A*», avec *A* appartenant à T_v . Par exemple, «*taille_de_Paul est MOYENNE*» est une proposition élémentaire définie à partir de la variable linguistique $(\text{taille_de_Paul}, \{\text{tailles}\}, \{. . ., \text{MOYENNE}, . . .\})$. La valeur de vérité d'une proposition élémentaire «*V est A*» est égale à $\mu_A(v)$ où *v* correspond à la valeur numérique exacte de *V*.

Une proposition floue générale est définie à partir de propositions élémentaires et d'opérateurs logiques binaires (et, ou, implique) ou un aire (non). Il existe plusieurs méthodes pour calculer la valeur de vérité de telles propositions. Nous ne donnons ici que les plus communément utilisées.

- **Conjonction** : $(V_1 \text{ est } A_1) \text{ et } (V_2 \text{ est } A_2)$

$$\min(\mu_{A_1}(v_1), \mu_{A_2}(v_2)) \quad (\text{Logique de Zadeh})$$

$$\max(\mu_{A_1}(v_1) + \mu_{A_2}(v_2) - 1, 0) \quad (\text{Logique de Lukasiewicz})$$

$$\mu_{A_1}(v_1) \cdot \mu_{A_2}(v_2) \quad (\text{Logique probabiliste})$$

- **Disjonction** : $(V_1 \text{ est } A_1) \text{ ou } (V_2 \text{ est } A_2)$

$$\max(\mu_{A_1}(v_1), \mu_{A_2}(v_2), 1) \quad (\text{Logique de Zadeh})$$

$$\min(\mu_{A_1}(v_1) + \mu_{A_2}(v_2), 1) \quad (\text{Logique de Lukasiewicz})$$

$$\mu_{A_1}(v_1) + \mu_{A_2}(v_2) - \mu_{A_1}(v_1) \cdot \mu_{A_2}(v_2) \quad (\text{Logique probabiliste})$$

- **Implication** : $(V_1 \text{ est } A_1) \text{ implique } (V_2 \text{ est } A_2)$

$$\min(1 - \mu_{A_1}(v_1) + \mu_{A_2}(v_2), 1) \text{ (Lukasiewicz)}$$

$$\min(\mu_{A_1}(v_1), \mu_{A_2}(v_2)) \text{ (Mamdani)}$$

$$\mu_{A_1}(v_1) \cdot \mu_{A_2}(v_2) \text{ (Larsen)}$$

- **Complémentation : non** ($V \text{ est } A$)

$$1 - \mu_A(v)$$

Dans ce qui précède, v , v_1 et v_2 correspondent à des instanciations numériques réelles des variables V , V_1 et V_2 .

Une *règle floue* est une proposition floue générale utilisant une implication entre deux propositions floues quelconques. Par exemple :

$(V_1 \text{ est } A_1)$ et $(V_2 \text{ est } A_2)$ **implique** $(V_3 \text{ est } A_3)$

ou sous une forme plus linguistique :

si $(V_1 \text{ est } A_1)$ et $(V_2 \text{ est } A_2)$ **alors** $(V_3 \text{ est } A_3)$

est une règle floue. La partie $(V_1 \text{ est } A_1)$ et $(V_2 \text{ est } A_2)$ est appelée *prémisse* de la règle et $(V_3 \text{ est } A_3)$ *conclusion*.

- **Activation d'une règle floue**

Une règle ne peut être activée (i.e. intervenir dans le processus d'inférence) que lorsque la valeur de vérité de la proposition floue constituant sa prémisse est non nulle.

III.4. Commande par logique floue

III.4.1. Introduction

Bien que la logique floue possède un champ d'application extrêmement vaste, nous nous intéressons ici qu'à son utilisation dans le cadre de la commande. En effet, cette méthode permet d'obtenir une loi de commande souvent très efficace sans devoir faire des études théoriques approfondies. L'algorithme de commande consiste en une collection de règles floues appelées base de règle. Dans cette section nous présentons toutes les bases générales du réglage et de la commande par logique floue.

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

La théorie de la logique floue traite deux problèmes :

1. théorie de l'ensemble flou
2. théorie de mesure floue

La motivation primaire de la logique floue est la possibilité d'exploiter la tolérance de l'imprécision et de l'inexactitude [18].

L'idée d'appliquer les techniques floues au domaine du contrôle des processus a été proposée la première fois par Change et Zadeh en 1972. Leur démarche reposait sur une approche à base de modèle en utilisant le concept de fonction flou. Les principes de la logique floue ont été appliqués en 1974 par E.H Mamdani à la construction d'un premier contrôleur flou pour une commande de vitesse d'un moteur [28].

Mais ce n'est que depuis quelques années que la commande floue a connu, essentiellement au Japon, un essor remarquable ; Elle a été appliquée à des problèmes aussi divers que la purification de l'eau, la fabrication du ciment, la marche automatisée d'une rame de métro, etc. [2], [5].

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

Actuellement, cette attitude a évolué. On peut penser que la commande floue va peu à peu prendre place dans la panoplie de l'ingénieur contemporain, sans supplanter les méthodes traditionnelles, et qu'elle constituera un complément précieux dans le cas des systèmes difficilement identifiables ou dont les paramètres subissent des variations brutales. Ils existent beaucoup d'efforts de recherches réussies pour les applications de la théorie de la logique floue aux systèmes à commander. Ces travaux montrent une performance remarquable de ce type de régulateur en comparant avec le régulateur PID conventionnel [2], [22].

III.4.2. Principe et réalisation d'un régulateur flou

III.4.2.1 Procédé général lors de la conception d'une commande par logique floue

Le procédé à suivre lors de la conception d'une commande par logique floue est assez différent de celui d'une commande conventionnelle. La (figure III.5) en montre les étapes principales. Généralement, lors de la conception d'un réglage ou d'une commande par logique floue nous commençons par une analyse approfondie sur le système à commander, ici il ne s'agit pas d'une recherche d'un modèle mathématique, mais il s'agit d'une exploration

complète du comportement du système vis-à-vis de variation de la commande, cette exploration peut apparaître comme une description du comportement dynamique du système, qui se fait par des variables linguistiques qui peuvent être accompagnées d'une définition par fonction d'appartenance.

L'étape suivante consiste à une recherche d'une stratégie de commande, elle comprend la phase de fuzzification, les inférences et la défuzzification. En suite l'implémentation qui se fait généralement sur un PC, elle est suivie par une opération de test sur une installation réelle qui comporte bien sur le système à commander.

Finalemnt afin de trouver un comportement convenable, le changement de la stratégie de commande en plusieurs passages est très indispensable.

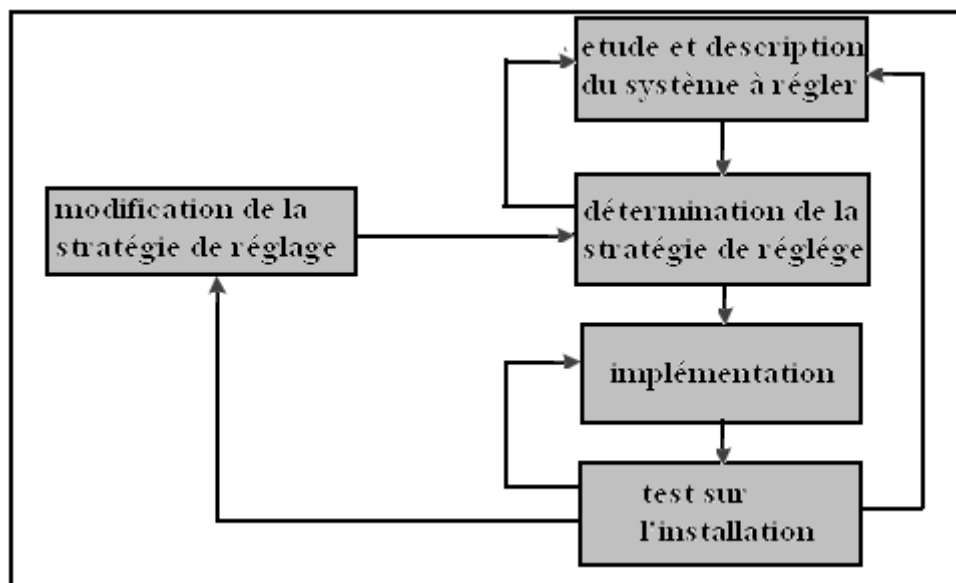


Figure III.5 : Procédé générale lors de la conception d'une commande par logique floue [7].

III.4.2.2. Propriétés d'une commande par logique floue

Les propriétés essentielles d'une commande par logique floue peuvent être résumées de la manière suivante [7] :

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

La détermination de la stratégie de commande représente l'étape la plus importante, lors de conception d'une commande par logique floue. En effet, cette dernière contient la détermination de plusieurs paramètres. L'ensemble de ces derniers est très important ; nombre

et forme des variables linguistiques des entrées, et mêmes des sorties, choix des différentes logiques, choix de la méthode de défuzzification....

L'analyse de l'influence de ces paramètres n'est évidemment pas une chose facile. Néanmoins, plusieurs études récentes ont tenté en partie de faire varier certains de ces paramètres pour dégager quelques règles. Des études concernant les fonctions d'appartenance ont été menées [31], [10], [7], [43], [25], [47], [26], [4], néanmoins la forme et le nombre de ces dernières sont très dépendants de l'application et ne peuvent se dissocier de la partie règles floues. Même chose pour les règles floues, une très grande quantité de travaux ont été réalisés dans le but est d'améliorer et innover cette partie très importante dans un régulateur flou. Parmi ces travaux on peut citer les plus récents tels que, [44], [46], [48], [47], [36], [8], [40], [34]. Des études ont été également menées concernant les gains de normalisation [32], [25], [48].

III.4.3. Structure d'un régulateur flou

Le régulateur par logique floue est composé de quatre éléments de base suivants [23], [24], [7], [33] :

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

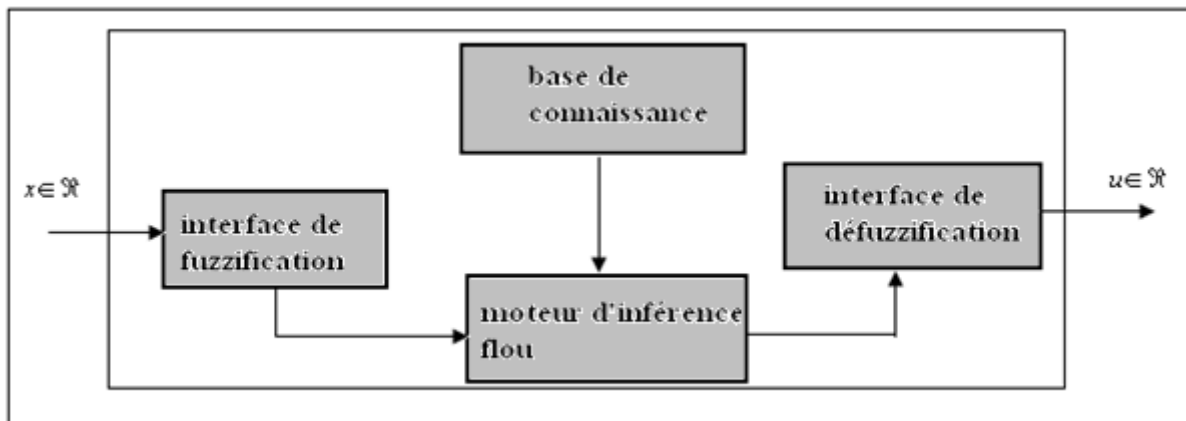


Figure III.6 : Structure de base d'un régulateur flou

III.4.3.1. Interface de fuzzification

Transforme les entrées numériques (vecteurs précises) en des ensembles flous. Le choix de l'opérateur de fuzzification dépend de la confiance que l'on accorde aux mesures effectuées. Ainsi si la mesure x_0 est exacte, le sous-ensemble flou A_x doit être représenté par un *fait*

précis. Par conséquent, on utilise comme opérateur de fuzzification la transformation dite de singleton. La fonction d'appartenance du sous ensemble flou A_x est alors définie par :

$$\mu_{A_x}(x) = \begin{cases} 1 & \text{Si } x = x_0 \\ 0 & \text{Si } x \neq x_0 \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

La (figure III.7) montre l'aspect de cette fonction d'appartenance.

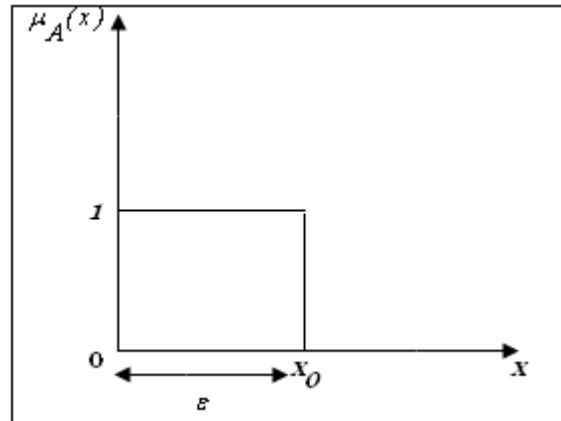


Figure III.7 : Méthode de fuzzification pour une mesure exacte

Par contre, si la mesure de la variable est incertaine, par exemple à cause du bruit, le sous-ensemble flou $x A$ doit être représenté par un fait imprécis. On utilise alors la méthode de fuzzification qui associé à la variable de mesure x_0 une fonction d'appartenance telle que, par exemple :

$$\mu_{A_x}(x) = \max \left\{ 0; 1 - \frac{|x - x_0|}{\epsilon} \right\} \quad (\text{III.16})$$

La représentation graphique de cette fonction est représentée par la (figure III.8). Ce sous-ensemble flou comprend donc la mesure x_0 avec une appartenance unité et les valeurs voisines de x_0 avec une appartenance inversement proportionnelle à l'écart avec x_0 .

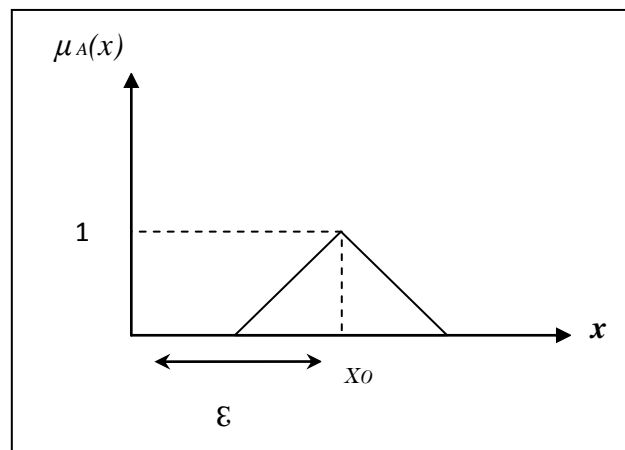


Figure III.8 : Méthode de fuzzification pour une mesure incertaine

La base du triangle (e) est fonction de l'importance relative des erreurs de mesures. En effet, plus elles sont importantes, plus la mesure de la variable x_0 devient imprécise, et donc, plus le triangle doit s'élargir.

III.4.3.2. Base de connaissances

La conception d'une base de connaissances représente la phase dans la conception des systèmes experts. Elle comprend la base de données et la base des règles floues

• La base de données

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

• La base des règles floues

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

$$R_1 : \text{Si } x_1 \text{ est } A_1^l \dots \text{et } x_n \text{ est } A_n^l$$

$$\text{Alors } u_j \text{ est } B^l$$

Avec :

$[x_1 \text{ K } x_n]$: les entrées du régulateur.

u_1 : la sortie du régulateur. Chaque régulateur activé donne un sous-ensemble flou de sortie.

III.4.3.3. Moteur d'inférence floue

C'est un mécanisme de décision. Il permet à partir d'un fait observé de la base des règles floues une décision en exploitant le raisonnement approximatif. Dans les inférences de régulateur par logique floue interviennent les opérateurs ET et OU. L'opérateur ET s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle tandis que l'opérateur OU lie les différentes règles. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser ces opérateurs dans une inférence et qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance à savoir :

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

III.4.3.3.1. Méthode d'inférence max-min

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

La (figure III.9) représente graphiquement le principe de la Méthode d'inférence max-min.

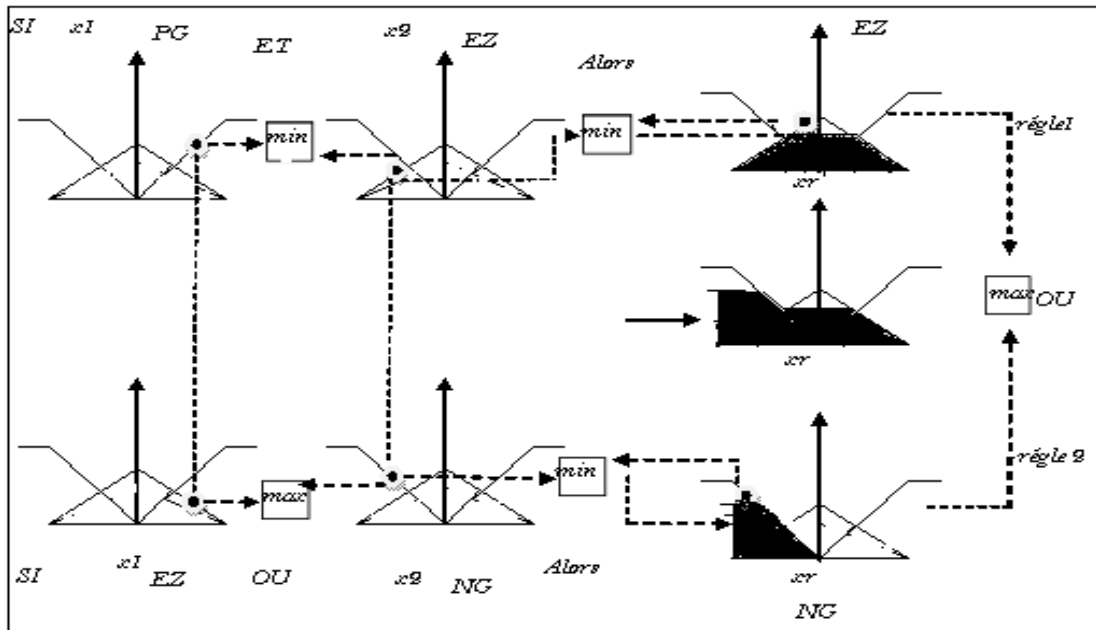


Figure III.9 : Méthode d'inférence max-min pour deux variables d'entrée et deux règles

III.4.3.3.2. Méthode d'inférence max-prod

La méthode d'inférence max-prod réalise en général, au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation du maximum et l'opérateur ET par la formation du minimum, par contre, la conclusion dans chaque règle, introduite par ALORS, qui lie le facteur d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie x_r par l'opérateur ET, est réalisée cette fois ci par la formation du produit (minimum pour la méthode d'inférence max-min). La représentation graphique du principe de la méthode d'inférence max-prod se trouve sur la (figure III.10).

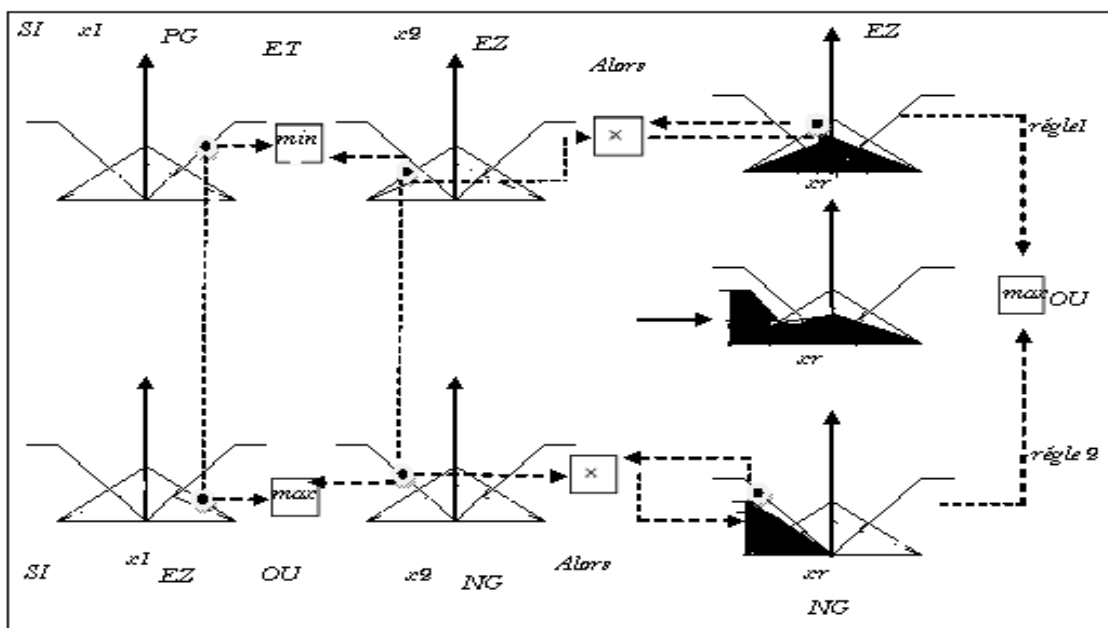


Figure III.10 : Méthode d'inférence max-prod pour deux variables d'entrée et deux règles

III.4.3.3. Méthode d'inférence somme-prod

Par opposition aux méthodes d'inférence précédentes, la Méthode d'inférence somme-prod réalise, au niveau de la condition, l'opération OU par la formation de la somme, plus précisément par la valeur moyenne, tandis que l'opération ET est réalisée par la formation du produit. La méthode d'inférence somme-prod est représentée à la (figure III.11).

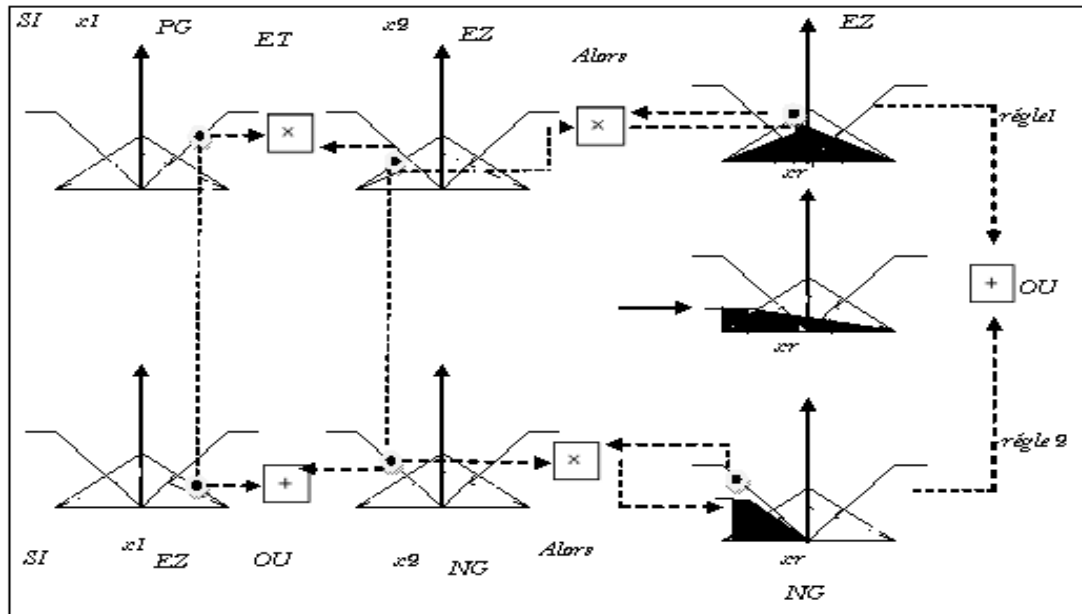


Figure III.11 : Méthode d'inférence somme-prod pour deux variables d'entrée et deux

III.4.3.4. Interface de défuzzification

La stratégie de commande utilisée est décrite par un ensemble de déclaration linguistique ou règles. Puisque le processus exige à ses entrées des valeurs non floues, l'ensemble flou de sortie du régulateur doit être défuzzifié. La défuzzification est l'opération qui consiste à extraire d'un ensemble flou une valeur numérique considérée comme valeur significative. Dans la commande en temps réel, un critère de choix de la commande de défuzzification est la simplicité de calcul.

Récemment [19], ils ont proposé une nouvelle méthode de défuzzification permet d'améliorer les inconvénients des méthodes classiques. Même, [6] ils ont suggéré trois nouvelles méthodes de défuzzification. En ce qui concerne les méthodes classiques, on peut citer les plus utilisées. La (figure III.12), illustre ces dernières graphiquement :

• **Méthode du centre de gravité (DEF1)**

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

$$Z = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_z(z_j) z_j}{\sum_{j=1}^n \mu_z(z_j)} \quad (\text{III.17})$$

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

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

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

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

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

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

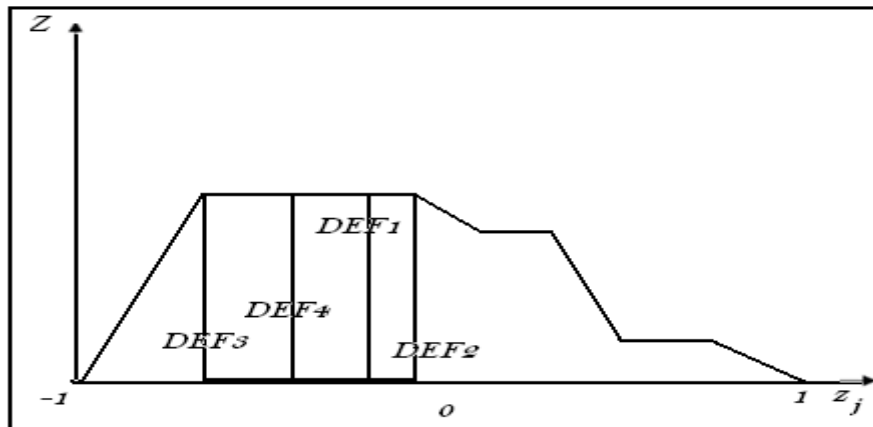


Figure III.12 : Différentes méthodes de défuzzification

III.4.4. Différents types de régulateurs flous

III.4.4.1. Régulateur de type Mamdani

Dans la plupart des applications reportées dans la littérature, un contrôleur de ce type est conçu pour réguler, asservir une variable de sortie d'un procédé, soit uniquement à partir de l'erreur e (consigne moins mesure), soit à partir de l'erreur et de sa variation Δe [14]. En 1974, E.H Mamdani avait présenté, pour la première fois, la technique de réglage par logique floue. Celle-ci consiste à déterminer un ensemble de règles qui maîtrise le comportement dynamique du système à commander. L'obtention de ces règles est facile auprès des experts qui connaissent bien le système. Il avait utilisé des règles à prémisses et conclusions symboliques, l'inférence (max, min), et la défuzzification par centre de gravité.

Après, Macvicar et Whelan ont observé que les bases de règles proposées par King et Mamdani étaient incomplètes. Ils ont fait une analyse détaillée sur ces bases de règles et

proposé une matrice de règles (voir *tableau III.1*) qui possède deux entrées, l'erreur et sa variation, en se basant sur les deux principes suivants [41],[5]:

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

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

<i>e</i> \ <i>de</i>	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZE
NS	NB	NB	NS	ZE	PS
ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
PS	NS	ZE	PS	PB	PB
PB	ZE	PS	PB	PB	PB

Tableau III.1 : Matrice de Macvicar-Whelan

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

de : Variation de l'erreur.

NB : Négatif grand "Negative Big".

NS: Négative petit "Negative Small".

ZE : Zéro

PS : Positif petit "Positive Small"

PB : Positif grand "Positive Big"

III.4.4.2. Régulateur de type Sugeno

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

$b^i = f(x_i, K, x_n)$, les prémisses étant symboliques[39].

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

La sortie du régulateur est donnée par :

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n b^i * \alpha_i(x)}{\sum_{j=1}^n \alpha_j} \tag{III.18}$$

Où les : α_i sont les valeurs de vérité de chaque règle pour $i = 1K \dots n$.

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

III.4.5. Principe du régulateur flou

III.4.5.1. Variables d'entrées du régulateur

Un régulateur flou permet de déterminer la commande à appliquer à un processus à partir de la valeur s de la variable de sortie de ce contrôleur ; celle-ci est elle-même déterminée à partir des valeurs des variables d'entrée e , Δe du régulateur par des relations floues, ou règles floues. Théoriquement, le nombre d'entrée n'est pas limité. En pratique, cependant, il n'est pas rationnel d'utiliser plus de trois variables d'entrée puisque la détermination des règles devient trop complexe.

Pour le régulateur décrit par la (figure III.13), nous n'avons intervenir que deux variables d'entrée :

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

$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$: Variation du signal d'écart à l'instant k .

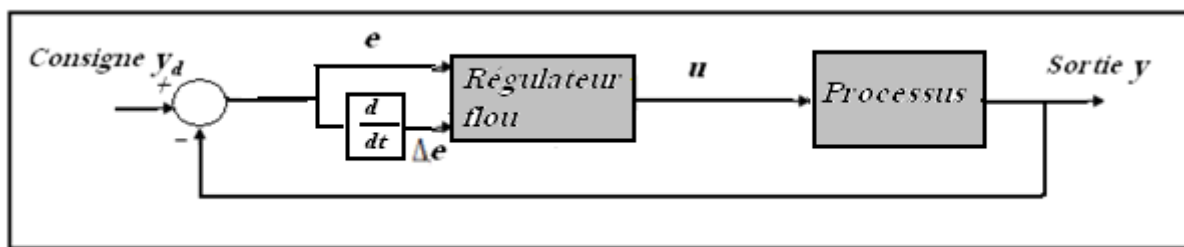


Figure III.13 : Schéma d'un système asservi par un régulateur flou

III.4.6. Avantages et inconvénients de la commande par logique floue

Certainement, la commande par logique floue comporte un certain nombre d'avantages et d'inconvénients [7]. Les avantages essentiels sont :

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

Par contre, les inconvénients sont :

- Le manque de méthodes systématiques précises pour la conception et la synthèse d'une commande par logique floue (par exemple dans le choix des grandeurs à mesurer, dans la

détermination des facteurs de normalisation, dans le choix de la stratégie, soit de la fuzzification, les inférences soit de la défuzzification,...),

- L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de commande en toute généralité,
- La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible),
- La possibilité d'apparition de cycles limites à cause du fonctionnement non linéaire.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les éléments de base relatifs à la théorie de la logique floue. En effet, des définitions de base sur les variables linguistiques, les sous ensembles flous, ainsi que les opérateurs flous ont été donnés. L'utilisation de la logique floue dans la commande a été également présentée en décrivant les différents éléments constitutifs d'un régulateur flou. A travers cette étude, nous constatons que deux types de régulateurs flous, celui de Mamdani et celui de Sugeno, sont les plus utilisés. Le chapitre suivant est consacré à l'application de cette loi de commande au système TRMS et compare avec la commande classique PID.

CHAPITRE IV

IV Simulation et Résultats

Discussion

IV.1. Introduction

Dans Cette partie, nous présentons les résultats obtenus de l'application en simulation des lois de commandes synthétisées précédemment, au simulateur d'hélicoptère.

Ces lois de commandes ont été testées d'abord pour des problèmes de stabilisation et de poursuite de trajectoires. En suite des variations paramétriques ainsi que des perturbations extérieures ont été introduites pour évaluer la robustesse.

IV.2. La Commande Linéaire

L'objectif principal de cette étape du projet est de déterminer le comportement du TRMS à la suite de l'utilisation d'un simple correcteur. Il existe plusieurs types de régulateurs, notre choix s'est porté sur le plus connu de tous, le régulateur PID tel que présenté à la (Figure IV.1). Comme notre système est non-linéaire le rôle du PID sera, dans une première phase, la stabilisation du TRMS autour d'un point de fonctionnement donné. Par la suite, nous allons tester la performance du régulateur PID lors d'une poursuite de trajectoire.

Le principe est de contrôler le mouvement vertical et horizontal séparément. Notre système étant fortement couplé, l'inconvénient de ce type de contrôleur est qu'il ne tient pas compte de l'influence d'un rotor sur l'autre.

Deux types de test sont appliqués au TRMS avec ce contrôleur :

- Un test de stabilité où les deux entrées sont des échelons. Son but, comme son nom l'indique, est de stabiliser le système autour d'un point donné et de déterminer en même temps l'influence du rotor principal sur la position horizontale.
- Un test de poursuite de trajectoire où l'entrées sont sous formes (sinusoïde et carrée). Le but est, en plus de faire suivre une trajectoire précise au TRMS, de déterminer l'influence du rotor de queue sur la position verticale [27] .

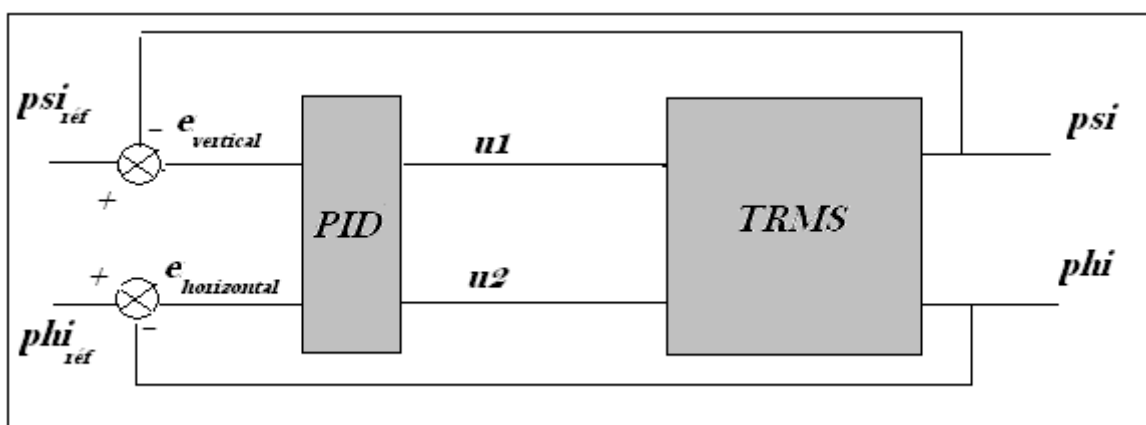


Figure IV.1 Schéma de principe de commande du TRMS par un PID.

IV.2.1. Le contrôleur linéaire PID

La (Figure IV.2) représente le schéma Simulink du contrôle du mouvement longitudinal et latéral du TRMS par un simple contrôleur. Ce dernier est composé par deux PID (PID_v pour le contrôle du mouvement vertical et PID_h pour le contrôle du mouvement horizontal tel que indiqué à la (Figure IV.3). Les signaux de rétroaction composés de φ et ψ sont comparés aux signaux de références. Les différences e_v et e_h représentent les entrées du correcteur.

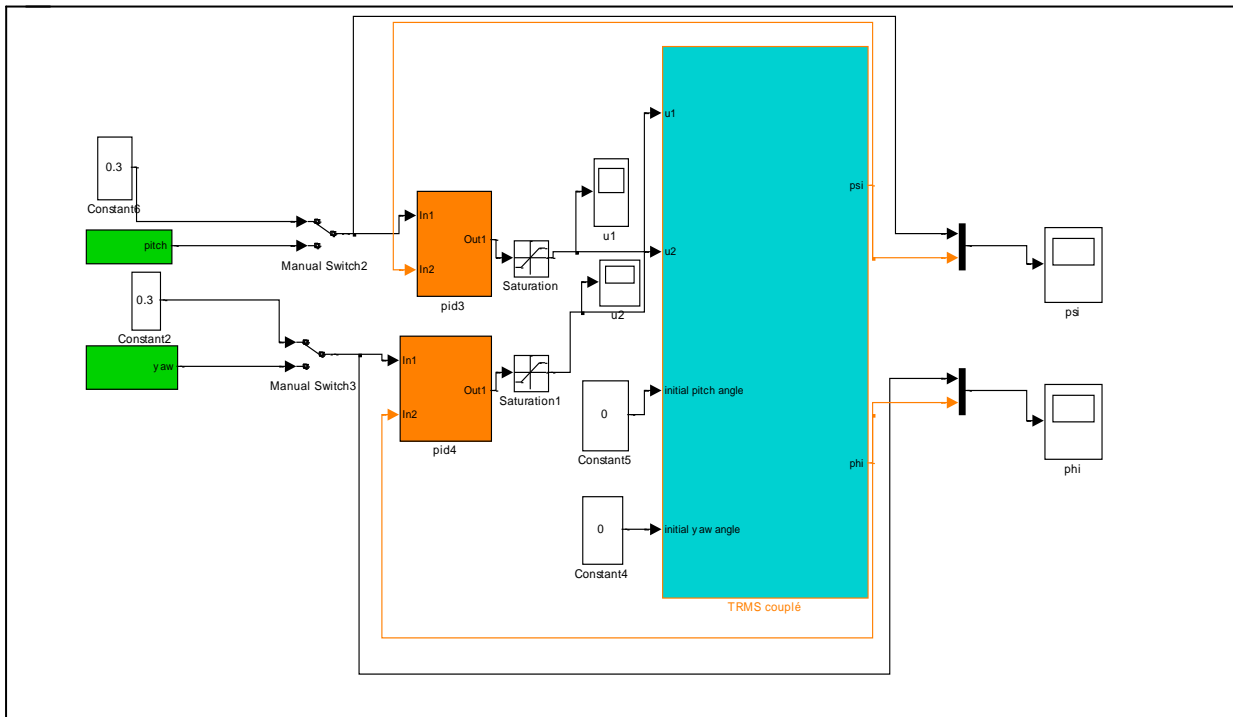


Figure IV.2 Schémas Simulink du TRMS avec un contrôleur linéaire.

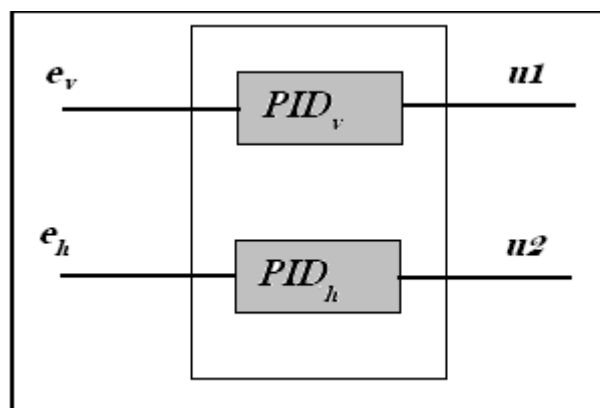


Figure IV.3 Structure du contrôleur linéaire.

Le (Tableau IV.1) représente les gains des PID

	k_p	k_d	k_i
PID_v	5	8	10
PID_h	2	0.5	5

Tableau IV.1 Gains du simple contrôleur linéaire (phase de simulation)

IV.2.2. Simulation

Les simulations des lois de commandes ont été réalisées par le logiciel MATLAB 7.9.0, par l'intermédiaire du Simulink. L'algorithme de résolution utilisée est celui de Runge-Kutta d'ordre 4 avec un pas de simulation de 0.001s. On fait un test de poursuite de trajectoire pour le TRMS. Tous les résultats obtenus, sont représentés dans les (Figures IV.4, IV.5, IV.6).

On constate une meilleure poursuite de trajectoire pour le mouvement latéral, cependant le mouvement longitudinal s'est un peu détérioré.

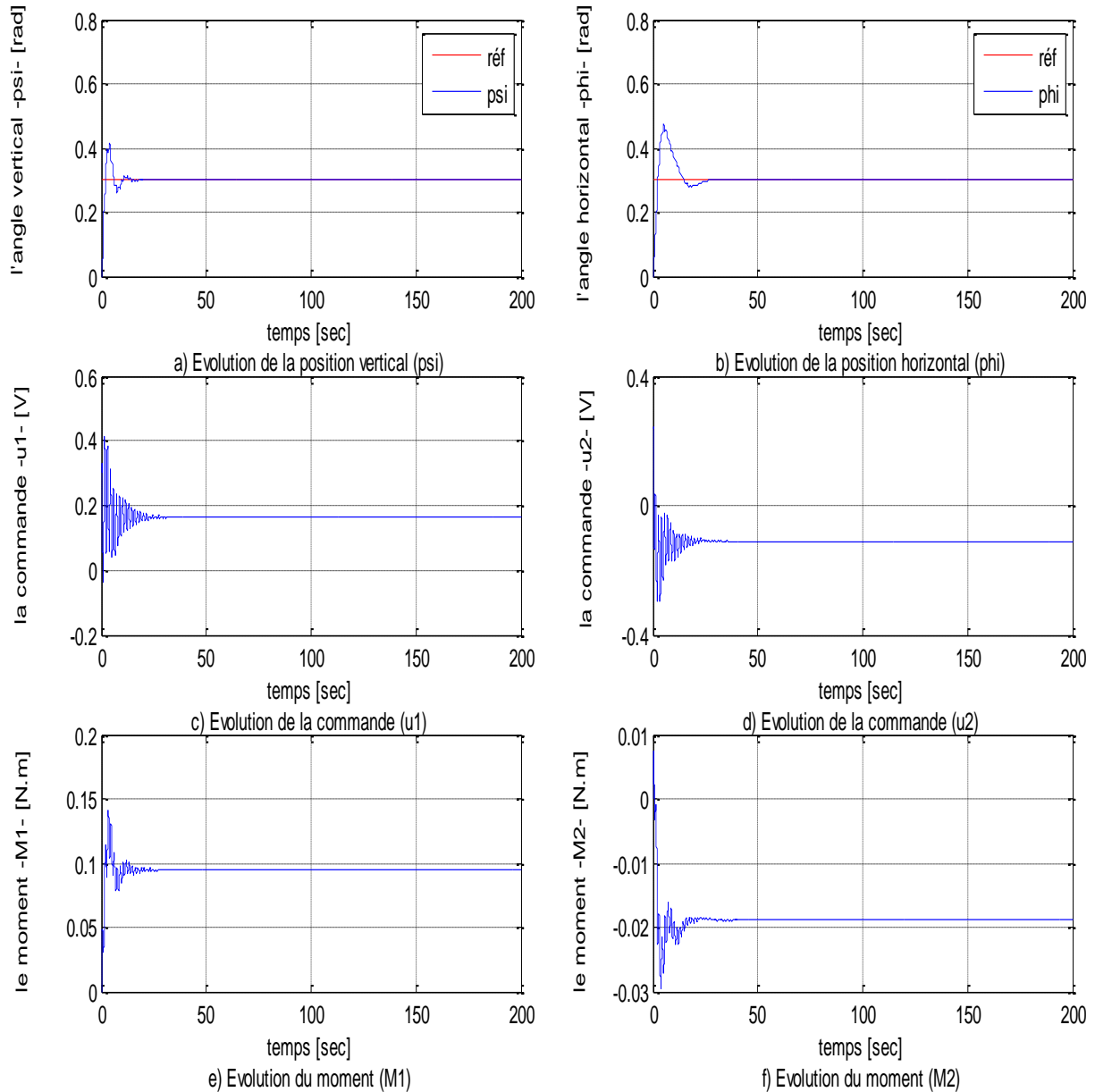


Figure IV.4 : Poursuite d'une trajectoire step en mode couplé

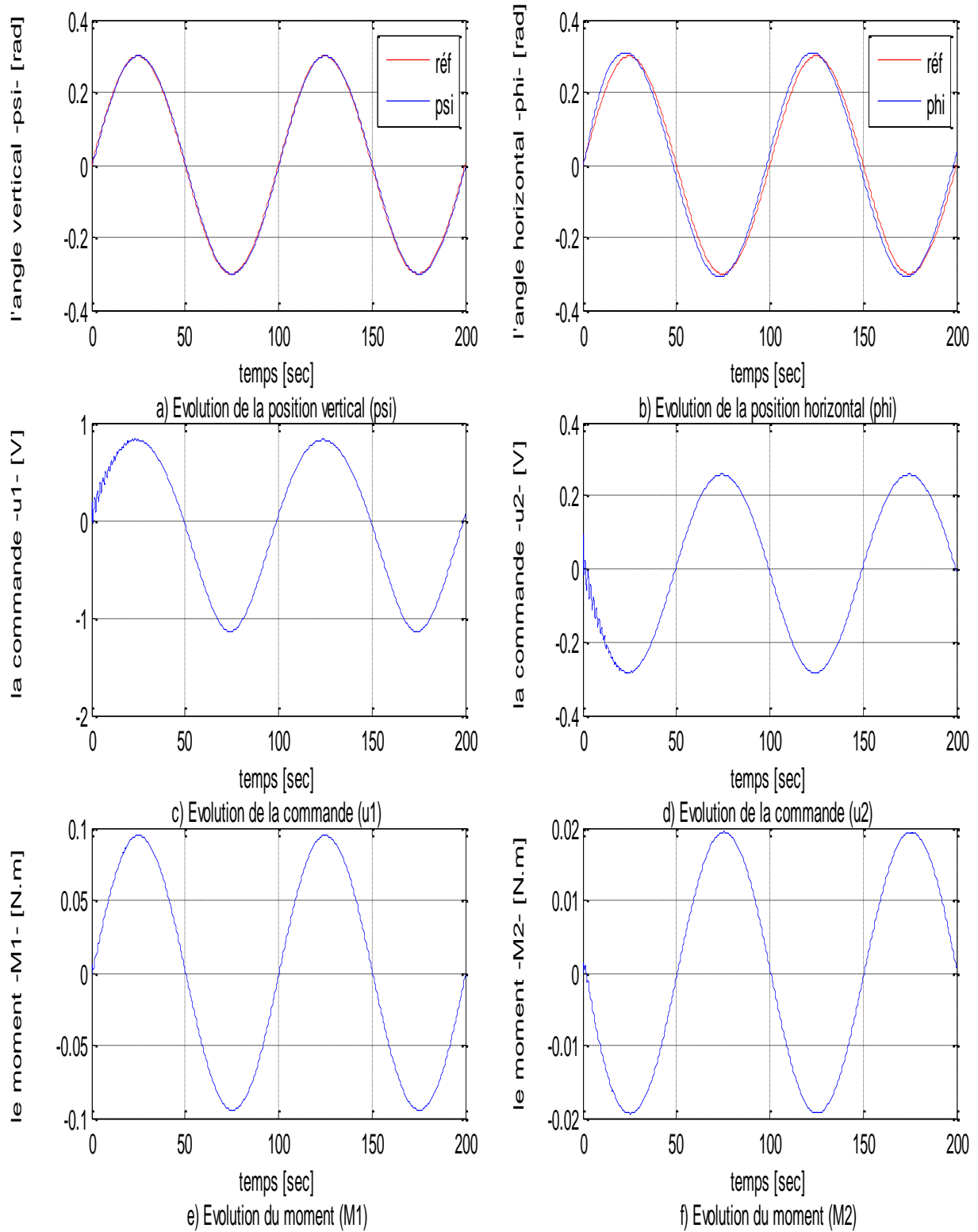


Figure IV.5 : Poursuite d'une trajectoire sinusoïdale en mode couplé

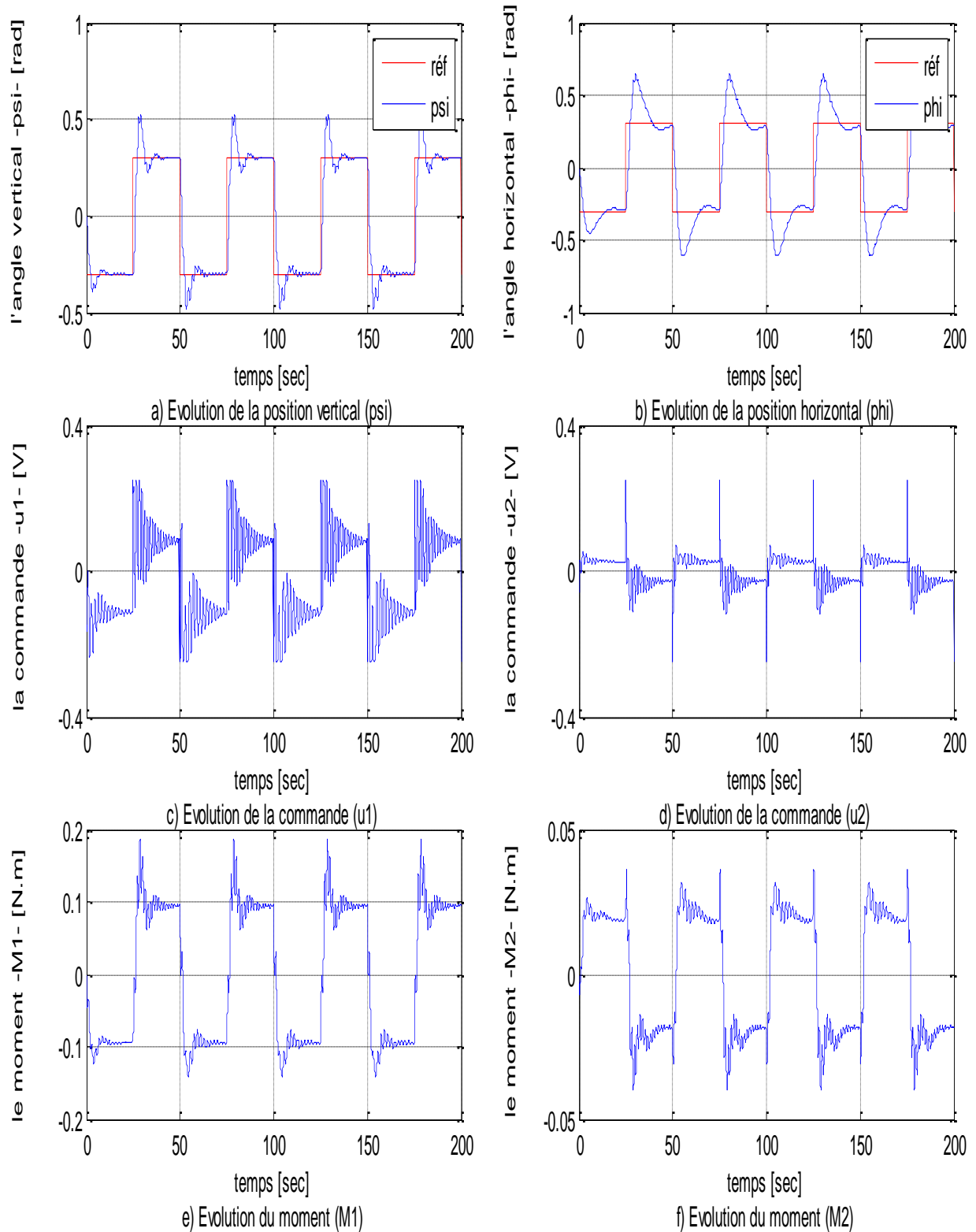


Figure IV.6 : Poursuite d'une trajectoire carrée en mode couplé

IV.2.3. Interprétation des résultats

A travers les résultats obtenus pour le régulateur PID, On constate une meilleure poursuite de trajectoire pour le mouvement latéral, cependant le mouvement longitudinal s'est un peu détérioré.

Et on remarque aussi la présence du dépassement et l'oscillation dans le régime transitoire, et On observe que la qualité des réponses du système dans le mode horizontal est meilleure de point de vue temps de réponse et oscillations par rapport au système en mode vertical. Il est à noter aussi que les erreurs en régime permanent pour la stabilisation sont nulles.

IV.3. Commande décentralisée par logique floue du système TRMS

IV.3.1. Introduction

Plusieurs travaux de recherche sur la commande de ce système ont été réalisés. Entre autres, on peut citer quelques travaux concernant des lois de commande:

- Basées sur la commande floue, soit en utilisant une commande décentralisée basée sur deux régulateurs PD flous de type Sugeno [2], soit avec une commande floue avec des gains programmés FGSC (Fuzzy Gain-Scheduled control) dans [37], soit en utilisant une commande floue à structure variable [17].
- Basées sur la commande par mode de glissement dans [37].
- Basées sur une commande PID standard, avec des gains réglés par la technique des algorithmes génétiques [16].
- Basées sur l'utilisation d'un compensateur Gaussienne linéaire quadratique (LQG), dans une boucle de commande [42], etc....

L'utilisation de la commande centralisée nécessite le traitement de toutes les variables E/S du système en même temps, donc un temps de calcul élevé. Par contre l'utilisation de la commande décentralisée facilite la synthèse et donne des lois de commandes non gourmandes en temps de calcul. Le système global sera décomposé en deux sous systèmes (vertical et horizontal), chacun d'eux est commandé indépendamment Les interconnexions seront considérées comme étant des perturbations sur chaque système. L'objectif de la commande floue ici est la régulation de l'angle d'élévation ainsi que l'angle d'azimut du système.

IV.3.2. Commande floue décentralisée du système TRMS

Cette commande à l'avantage de ne pas avoir besoin du modèle mathématique pour la synthèse, elle se caractérise par la simplicité de synthèse de la loi de commande. Sur la (*figure IV.7*) sont représentés les deux régulateurs flous des deux sous systèmes du TRMS. Ces derniers sont indépendants les uns des autres, chacun à deux entrées qui sont l'erreur et la

variation de l'erreur et une sortie qui caractérise la variation de commande à appliquer au sous système correspondant.

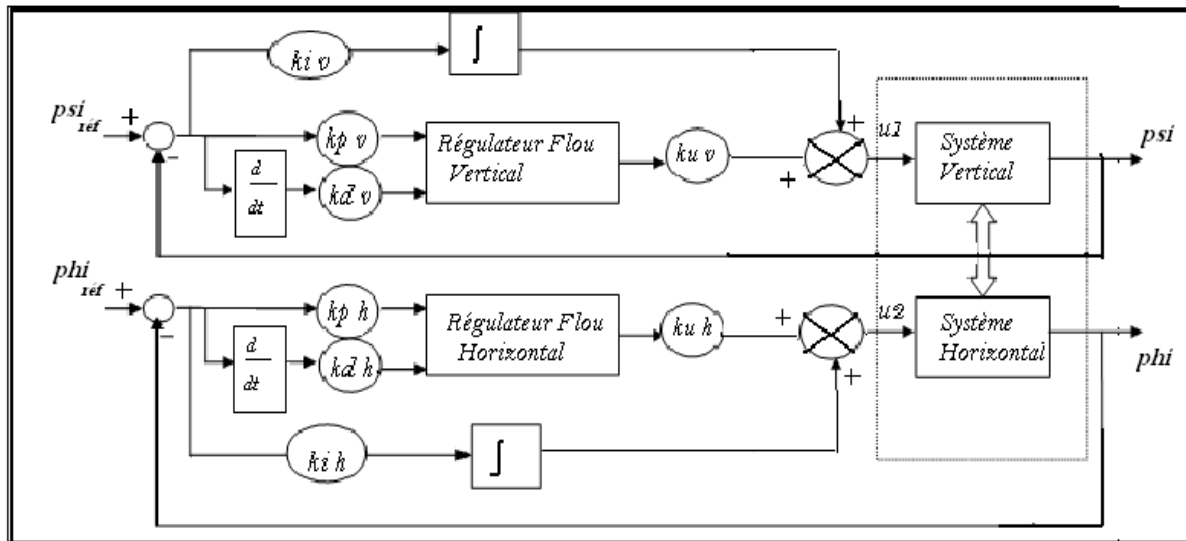


Figure IV.7 : Structure de la commande floue pour le système TRMS.

IV.3.2.1. Structure de régulateur flou de MAMDANI

Le schéma du régulateur de type MAMDANI est composé de :

- Un bloc de calcul de la variation de l'erreur (De) au cours du temps.
- Les facteurs d'échelle ou gains de normalisation associés à l'erreur (e), à sa variation (De), et à la commande (U). Les valeurs numériques de ces derniers sont données par le (tableau IV.3).
- Un bloc de fuzzification de l'erreur et de sa variation, avec des fonctions d'appartenance de type triangulaire.
- Une base de règles de contrôle flou donnée par le (tableau IV.2).
- Une logique pour l'évaluation des règles de contrôle flou (inférence). Pour notre cas c'est la méthode max-min qui est utilisée.
- Un bloc de défuzzification servant à convertir la commande floue en une valeur numérique significative. La méthode utilisée est celle du centre de gravité.

e \ de	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	ZE
NM	NVB	NVB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NVB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NS	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PVB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PVB	PVB
PB	ZE	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB

Tableau IV.2 : Base de règles de chaque régulateur flou (7×7)

Avec:

PVB: Positive very Big / **NB:** Negative Big/ **NM:** Negative medium /**NS:** Negative Small **EZ:** Equal Zero /**PS:** Positive Small /**PM:** Positive medium /**PB:** Positive Big /**PVB:** Positive very Big

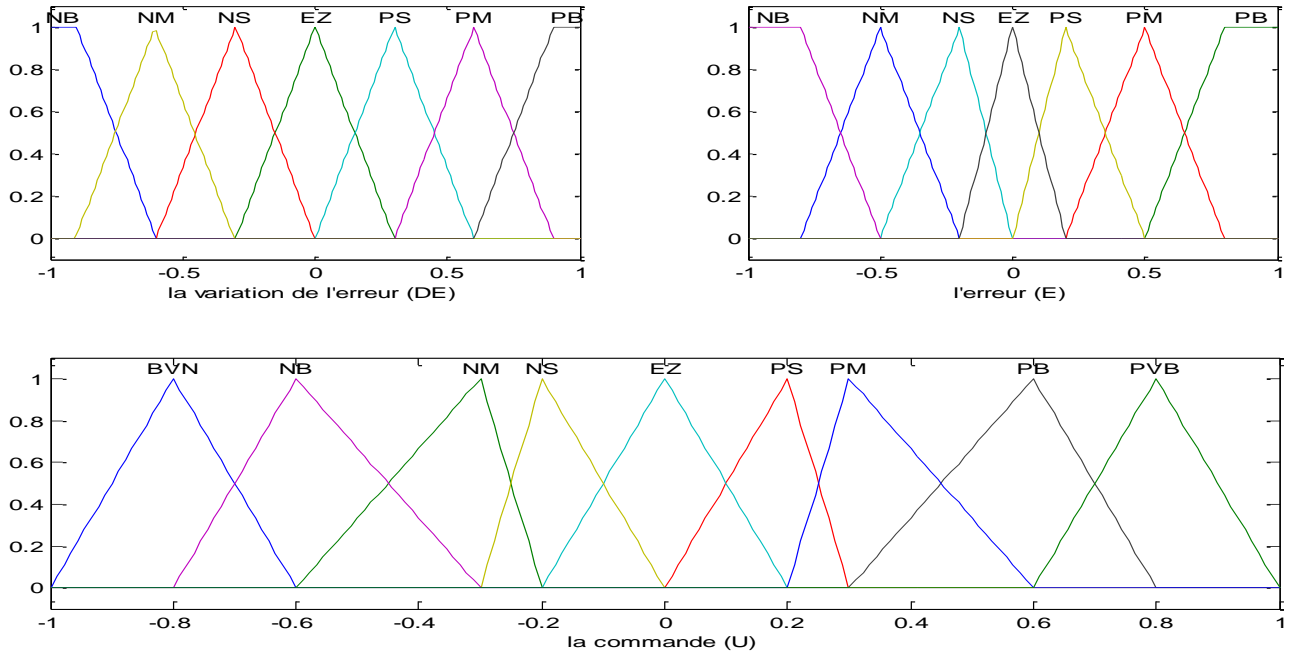


Figure IV.8: Fonctions d'appartenances pour les variables d'entrées/sorties du sous-système Vertical

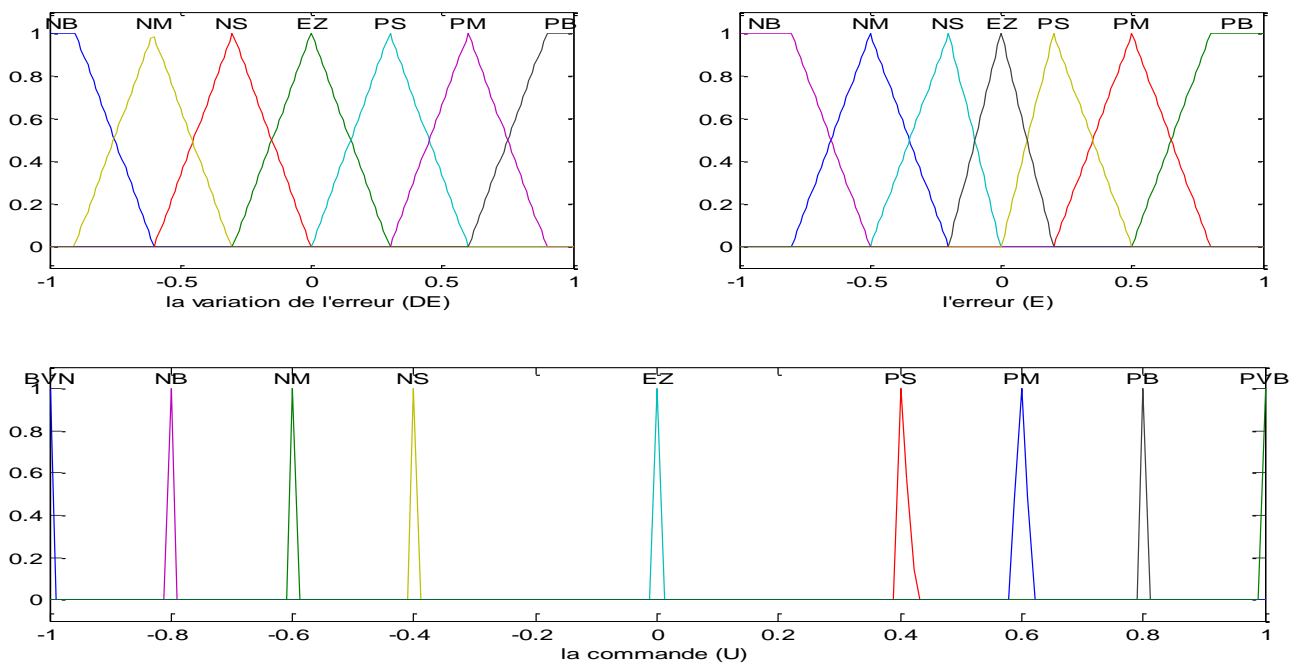


Figure IV.9: Fonctions d'appartenances pour les variables d'entrées/sortie du sous-système horizontal

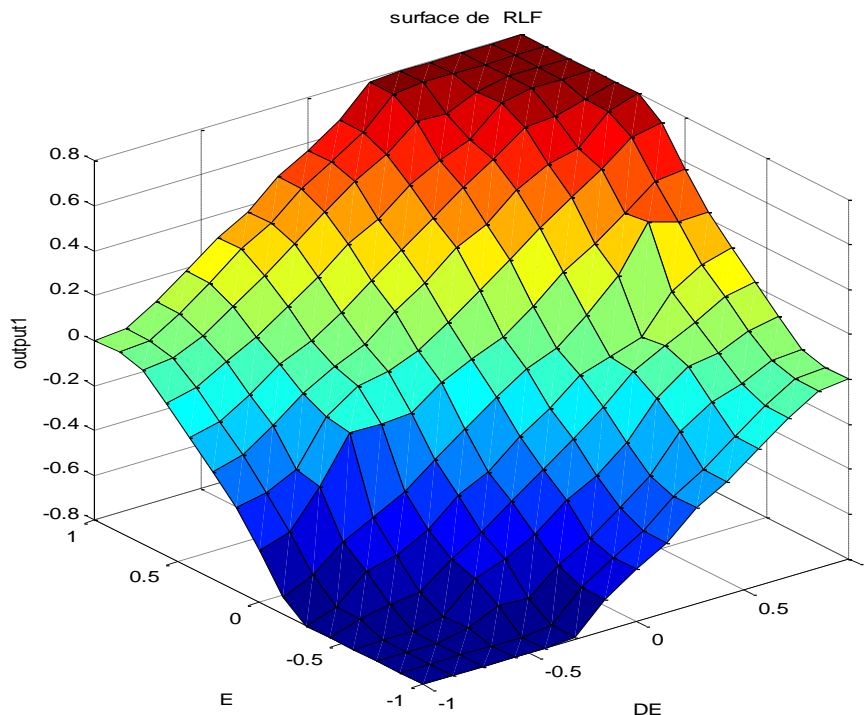


Figure IV.10: Surface du régulateur flou

IV.3.2.2. Les gains de normalisation

L'une des choses les plus importantes dans la commande floue est de trouver les gains de l'erreur, variation de l'erreur et de la commande ou encore gains de normalisation. Ajoutés à cela, le gain de l'action intégrale En effet, ce sont ces derniers qui fixeront les performances de la commande. Il n'y a aucune méthode systématique qui donne ces paramètres d'emblée ; en effet, il faut procéder par un tâtonnement en utilisant des règles empiriques et l'expérience acquise au fil du temps.

<i>Gain vertical</i>	<i>Valeur numérique</i>	<i>Gain horizontal</i>	<i>Valeur numérique</i>
G_{1p} de normalisation	1.8	G_{5p} de normalisation	5.5
G_{2d} de normalisation	4	G_{6d} de normalisation	5.5
G_{3i} de normalisation	1.3	G_{7i} de normalisation	0.1
G_4 de dénormalisation	4	G_8 de dénormalisation	14

Tableau IV.3 : Valeurs numériques des gains de normalisation et de dénormalisation

IV.3.2.3. Simulation du régulateur flou

La (figure IV.11) présente le schéma bloc en Simulink du système en boucle fermée avec les deux régulateurs flous.

Généralement, le TRMS peut fonctionner en trois modes différents ;

- Le mode de fonctionnement horizontal découplé **1-DDL** (un seul degré de liberté); ici le simulateur utilise seulement le propulseur secondaire. Le but du régulateur flou dans ce mode est l'asservissement de l'angle d'azimut φ ,
- Le mode de fonctionnement vertical découplé **1-DDL** ; ici le simulateur utilise seulement le propulseur principal. Le but du régulateur flou dans ce mode est l'asservissement de l'angle d'élévation ψ ,
- Le mode de fonctionnement couplé **2-DDL** (deux degrés de liberté) ; ici le simulateur utilise les deux propulseurs en même temps. Le but du régulateur flou dans ce mode est l'asservissement des deux angles, d'azimut φ et d'élévation ψ .

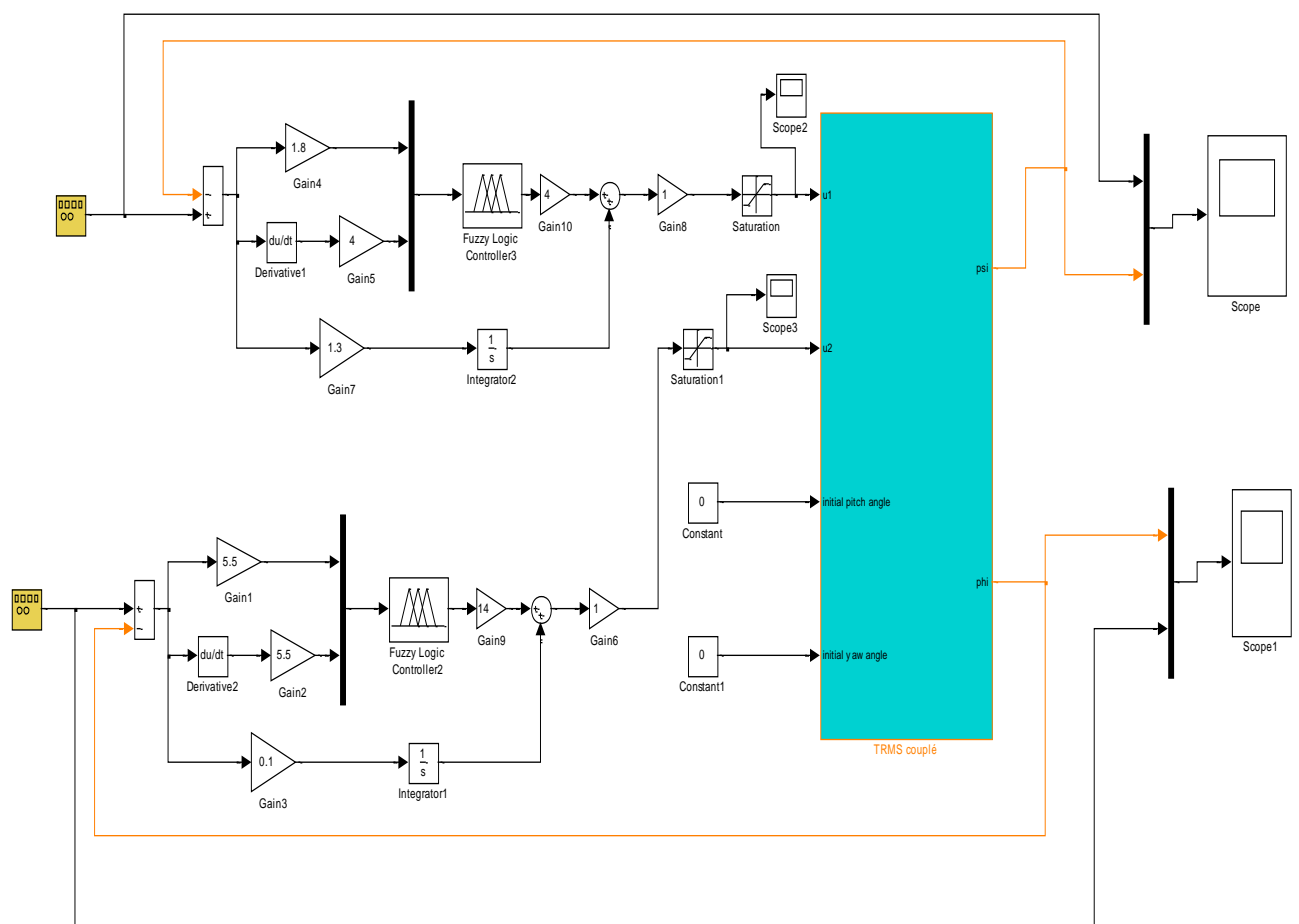


Figure IV.11 : Schéma bloc en Simulink de boucle de commande floue pour le système TRMS en mode couplé.

Les simulations des lois de commandes ont été réalisées par le logiciel MATLAB 7.9.0, par l'intermédiaire du Simulink. L'algorithme de résolution utilisée est celui de Runge-Kutta d'ordre 4 avec un pas de simulation de 0.001s.

Nous avons testé cette commande pour des problèmes de stabilisation ainsi que des problèmes de variations paramétriques pour évaluer la robustesse. Tous les résultats obtenus, sont représentés dans les (figures IV.12 -15).

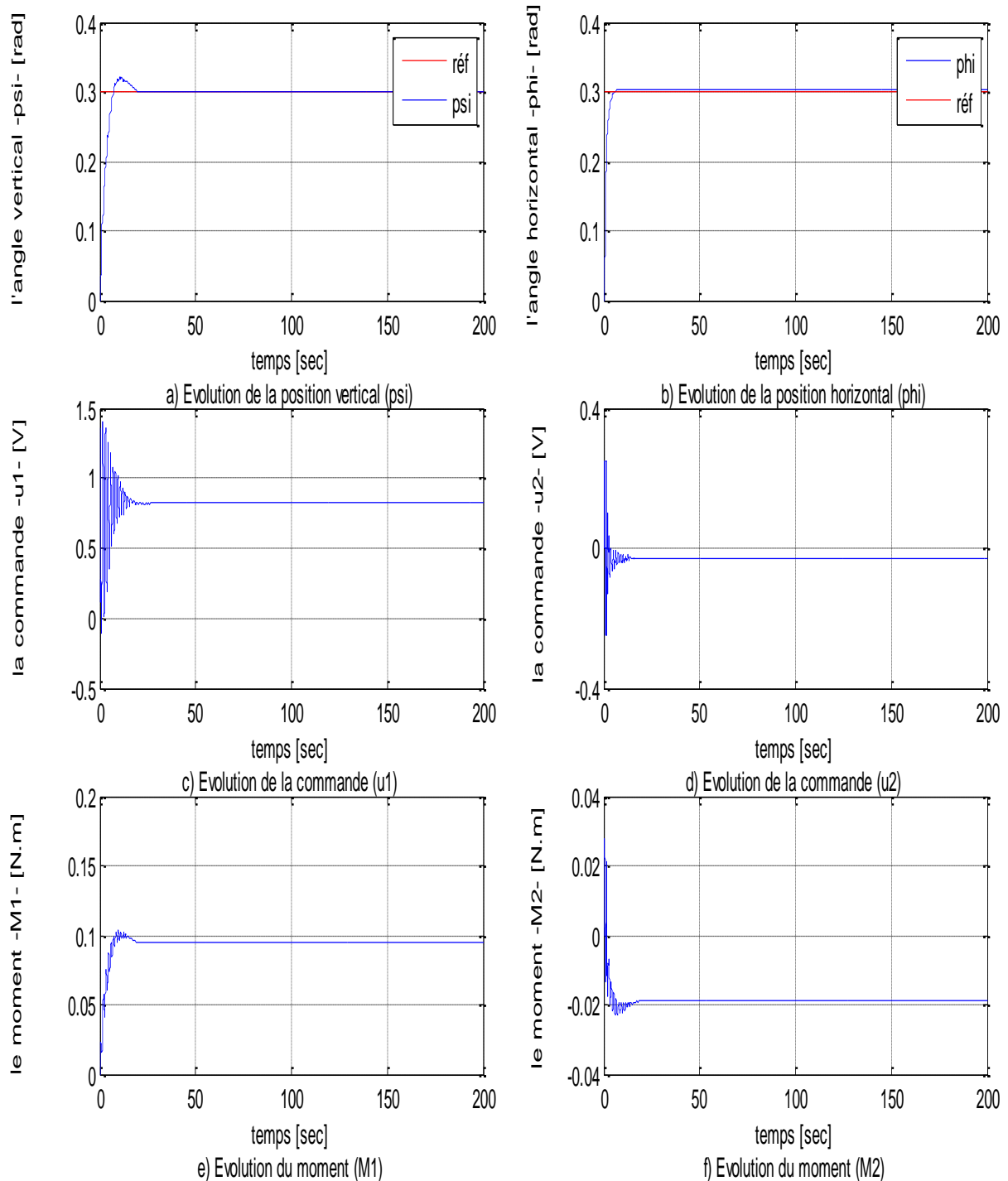


Figure IV.12 : Poursuite d'une trajectoire step en mode couplé

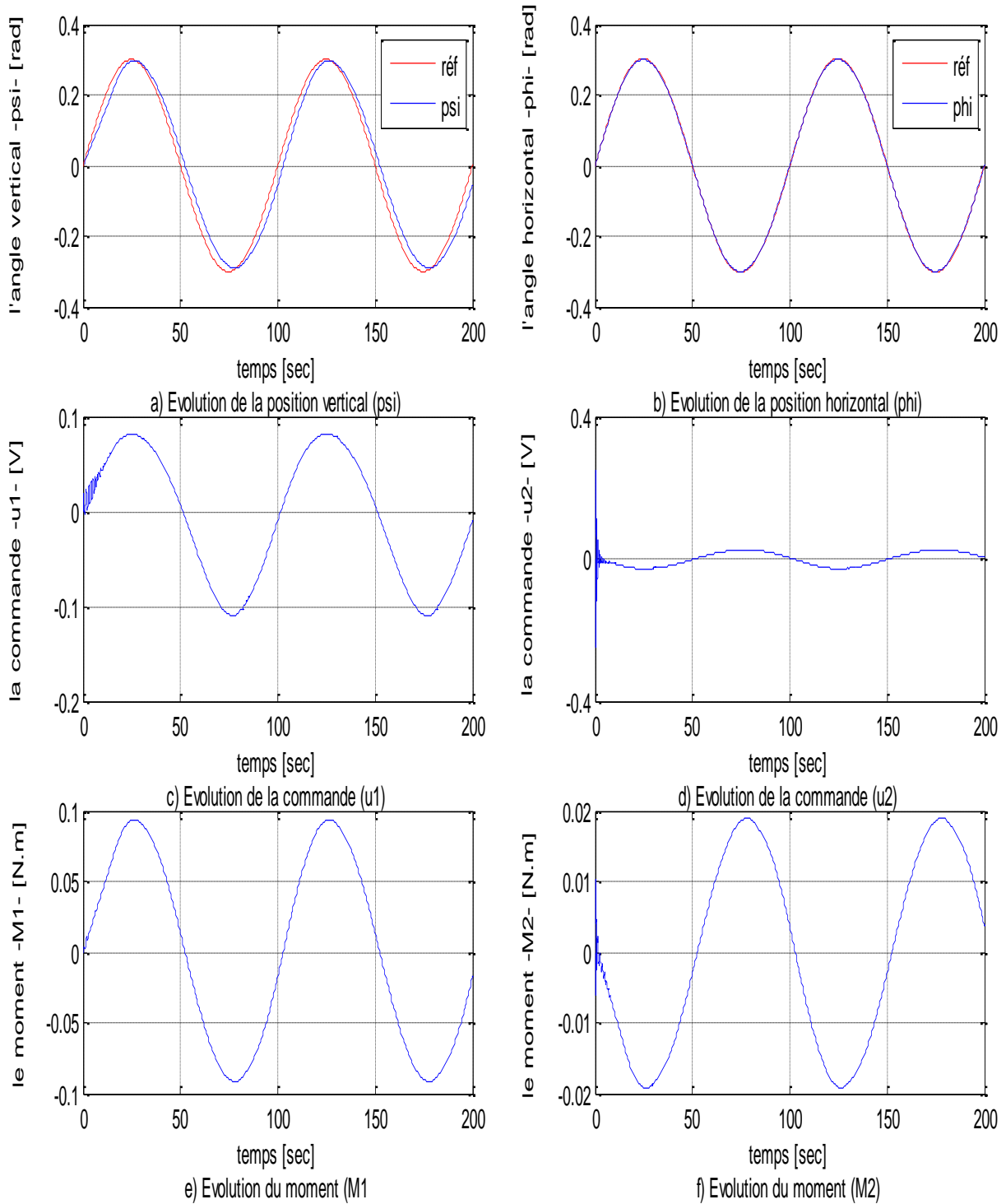


Figure IV.13 : Poursuite d'une trajectoire sinusoïdale en mode couplé.

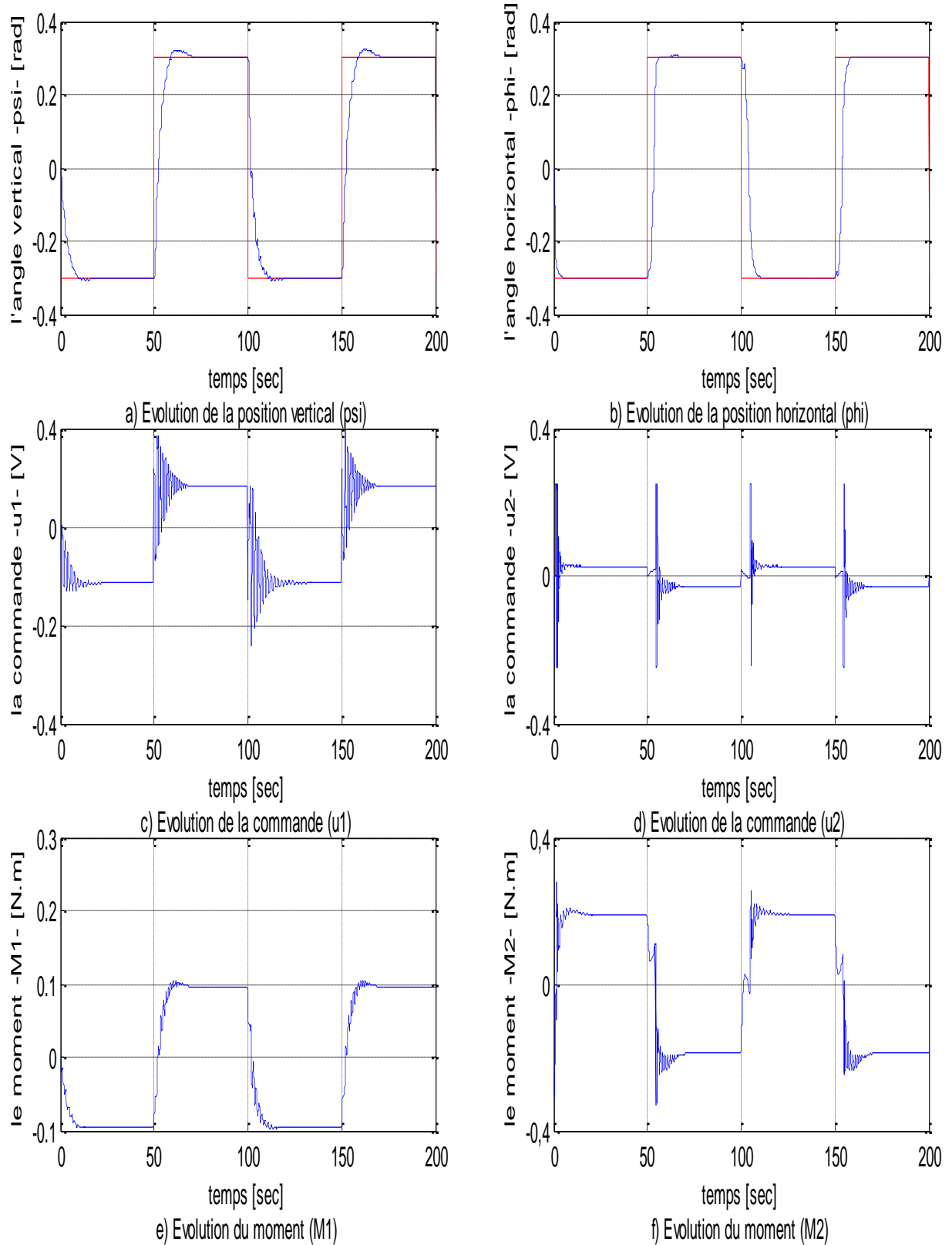


Figure IV.14 : Poursuite d'une trajectoire carrée en mode couplé

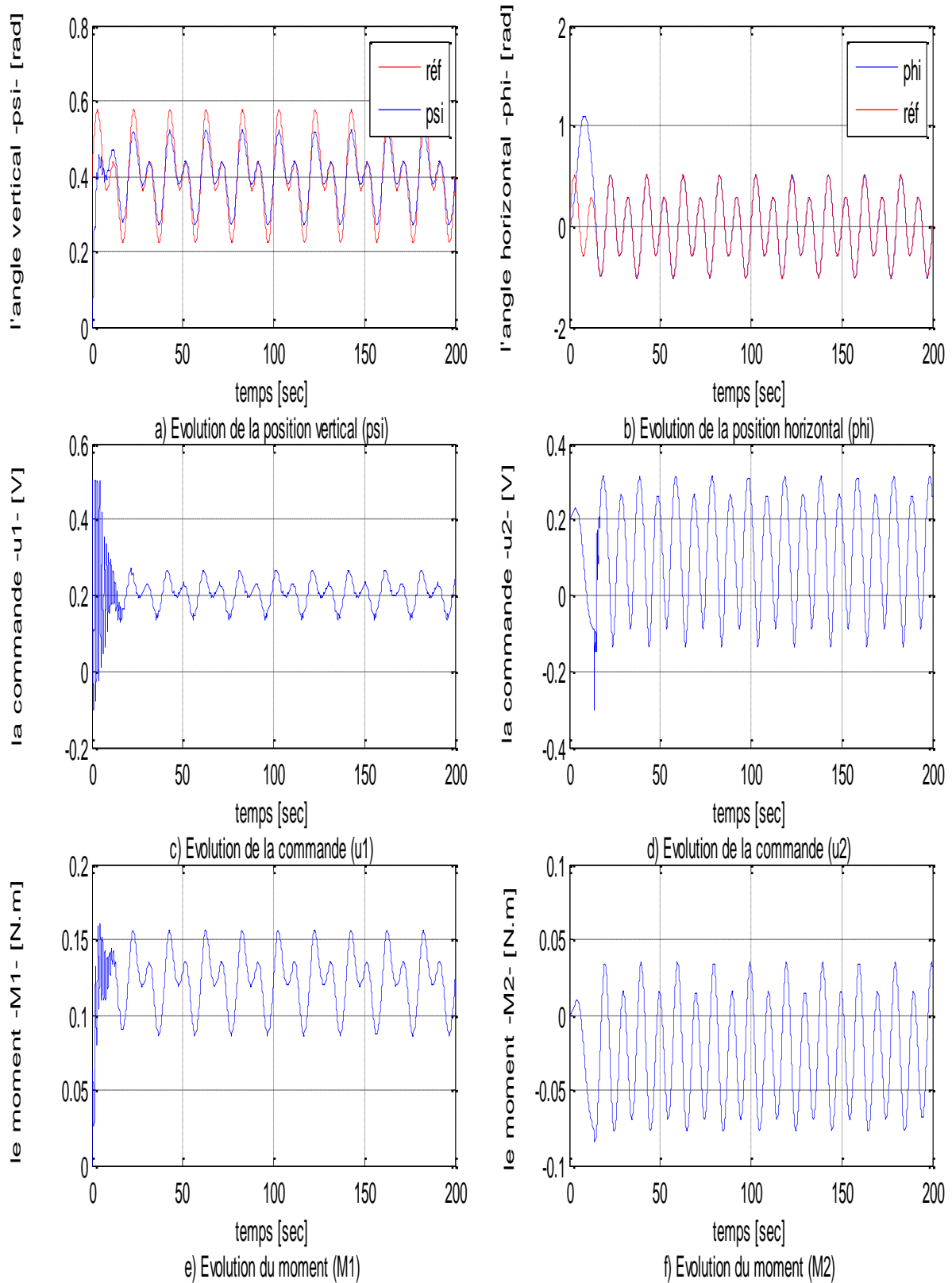


Figure IV.15: Poursuite d'une trajectoire variante en mode couplé

IV.3.2.4. Interprétation des résultats

A travers les résultats obtenus nous avons pu constater que les performances pour l'angle φ sont meilleures que celles de l'angle vertical ψ en terme de temps de réponse et oscillations. Cela est dû au comportement dynamique plus complexe du sous-système vertical à cause de la présence des forces de gravitation. Cela est apparent en particulier au niveau du démarrage où les commandes sont plus sollicitées en mode vertical par rapport au mode horizontal, mais leurs valeurs restent toujours dans les limites tolérées par les actionneurs. Il est à noter aussi que les erreurs en régime permanent pour la stabilisation sont nulles.

IV.3.2.5. Test de robustesse en mode couplé (2 DDL) avec variation paramétrique (b2)

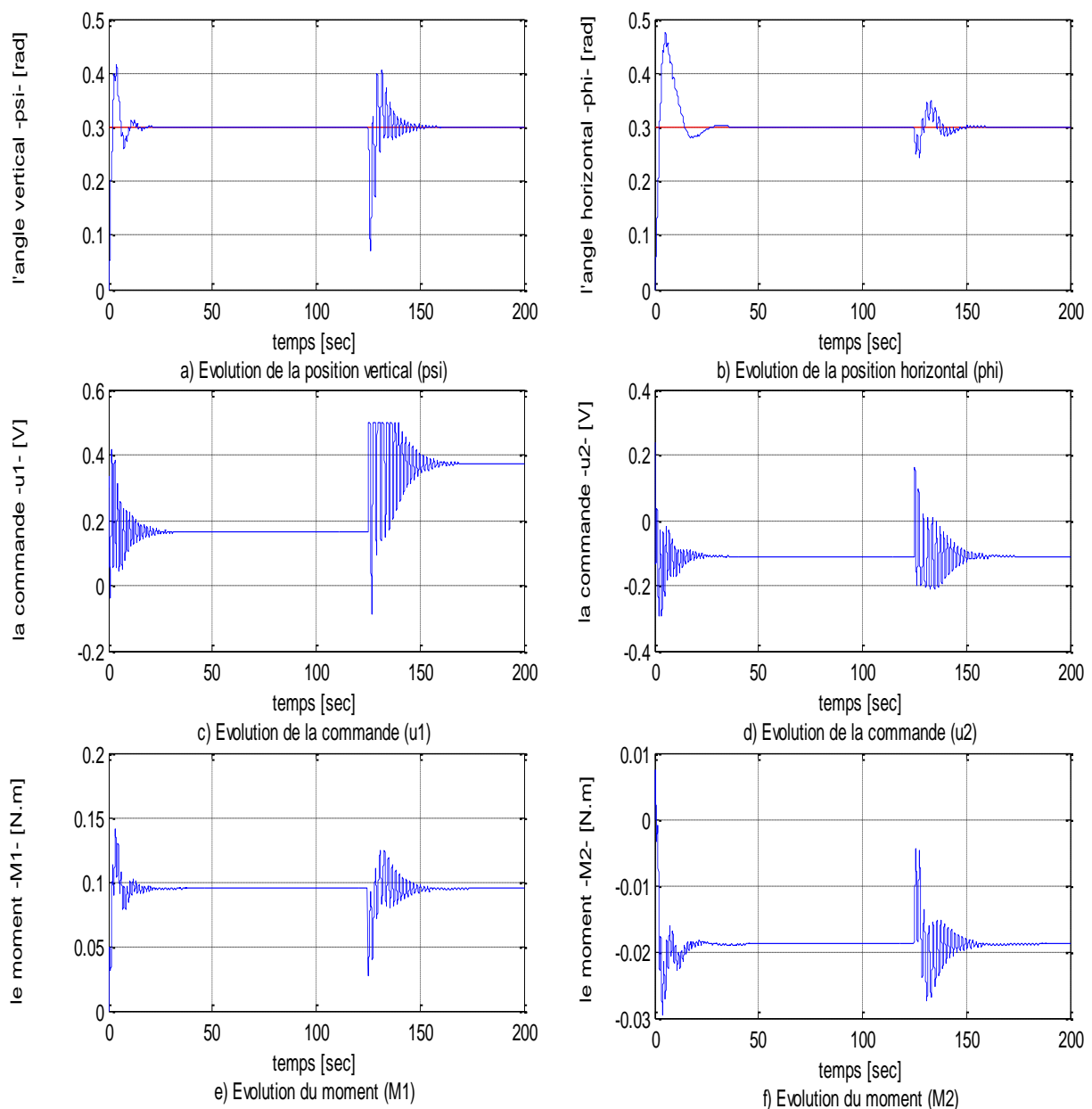


Figure IV.16: Poursuite d'une trajectoire step en mode couplé d'un contrôleur PID avec variation paramétrique (b2)

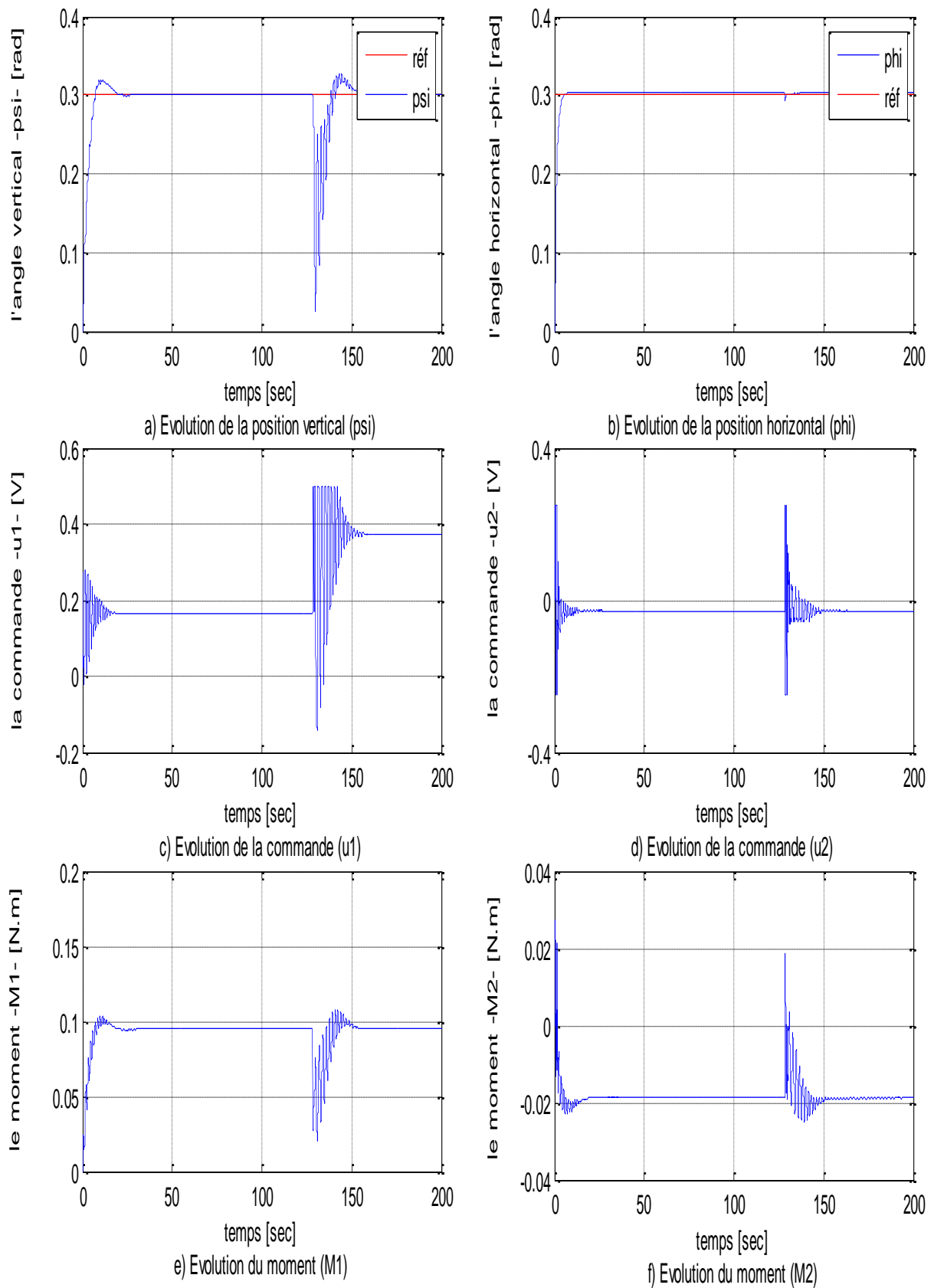


Figure IV.17 : Poursuite d'une trajectoire step en mode couplé d'un contrôleur flou avec variation paramétrique (b2)

IV.3.2.6. Interprétation des résultats

Les résultats obtenus montrent que la stabilisation est assurée après la variation paramétrique (b2) pour l'élévation comme pour l'azimut, mais avec des dépassements qui diffèrent selon le mode de fonctionnement, on constate aussi que les performances vis-à-vis les variations paramétriques du régulateur flou sont nettement meilleures par rapport au réglage classique PID.

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation des deux lois de commandes sont : la commande classique avec contrôleur PID et la commande par logique floue, Nous avons vu que la commande par logique floue est donnée des bons résultats en terme de poursuite de trajectoire que la commande classique, nous avons vu aussi que les performances vis-à-vis les variations paramétriques (b2) sont nettement meilleur par rapport au réglage classique PID. Et que l'utilisation de la logique floue permet d'augmenter la robustesse tout en diminuant l'énergie de commande.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la commande des systèmes physiques non linéaires MIMO en utilisant les techniques avancées de l'automatique telles que la logique floue. Lorsqu'un modèle est partiellement inconnu ou complexe, un contrôleur flou s'avère très intéressant. Les commandes sont réalisées sans avoir recours au modèle analytique. Les algorithmes de réglage se basent sur des règles linguistiques de la forme Si...Alors.

Pour commencer, Nous avons fait une présentation de la plate forme réelle du système TRMS, nous expliquons le rôle principal de chaque élément dans ce système.

Dans le second chapitre le modèle mathématique d'un système électromécanique complexe on été développé. C'est le simulateur de vol d'hélicoptère. Le modèle élaboré a permis de mettre évidence la complexité du comportement dynamique de système.

D'ailleurs c'est un système qu'on rencontre souvent dans la littérature du domaine de l'automatique.

Le chapitre suivant a permis de rappeler les bases générales de la théorie de la logique floue, ainsi que de la commande par logique floue. Nous avons illustré la structure élémentaire d'un régulateur par logique floue, ainsi en analysant sa structure.

Comme étape finale, Une commande par logique floue a été ensuite synthétisée est évoluée. Elle a permis la stabilisation de ce système. Par ailleurs, les résultats obtenus dans la simulation ont montré la robustesse de cette commande par rapport aux différentes variations paramétriques.

Les différentes structures de commande par logique floue appliquées à ce système ont montré leurs efficacités, et leurs performances.

Enfin, le travail présenté dans ce mémoire peut être amélioré en utilisant une autre technique de la commande intelligente comme la commande Neuro-floue.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Z.M.Yeh, "A Systematic Method for Design of Multivariable Fuzzy Logic Control Systems," *IEEE Trans. Fuzzy syst*, vol. 7, pp. 741-752, Oct. 1999.
- [2] H. X Li, "Approximate Model Reference Adaptive Mechanism for Nominal Gain Design of Fuzzy Control system," *IEEE Transactions on systems Man and Cybernetics, Part B*, vol 29, pp 41-46, 1999.
- [3] S. Ouattara, P. Loslever, T.M. Guerra, "Towards a methodology for selecting good scaling factors for a fuzzy controller," *Fuzzy Sets and Systems*, vol 83, pp 27-42, 1996.
- [4] H. Ying, "Fuzzy control and Modelling, Analytical Foundations and Applications," 2000 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers. Inc.
- [5] E.H. Mamdani, "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant," *Proceedings of IEEE*, vol 121, no12, pp 1585-1588, 1974.
- [6] T. Takagi, M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and Its applications to modelling and control," *IEEE Transactions on systems Man and Cybernetics*, vol 15, no1, pp 116-132, 1985.
- [7] M. Mizumoto, "Fuzzy controls under various fuzzy reasoning methods," *Information Sciences*, vol 45, pp 129-151, 1988
- [8] K. M. Passino. et S.Yurkovich, "Fuzzy Control," © 1998 Addison Wesley Longman, Inc.
- [9] Feedback Instruments LTD, "Twin Rotor MIMO system control experiments," 1, 33-949S Sussex, UK, 1997.
- [10] D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrank, "An introduction to fuzzy control," *Springer-Verlag*, Berlin Heidelberg, 1993.
- [11] Feedback Instruments LTD, "Twin Rotor MIMO system Getting Started Manual," 1, 33-007-1M5 Sussex, UK, 1997.
- [12] Feedback Instruments LTD, "Twin Rotor MIMO system advanced Teaching Manual," 1, 33-007-4M5 Sussex, UK, 1997.
- [13] S. M. Ahmad, A. J. Chipperfield et M. O. Tokhi, "Dynamic Modelling of a Two Degree-of-Freedom Twin Rotor Multi-Input Multi-output System," *Proc. IEE United Kingdom Automatic Control Conference (UKACC2000)*, Cambridge, UK, 2000.
- [14] U.Badar, A. Nisar, L. Daud, K. Shahid, L. Ghulam, "Controller Design Using Fuzzy Logic For A twin Rotor MIMO system," *Proceedings IEEE INMIC*, pp.264-268 2003.

- [15] J.P. Barrat, M. Barrat et Y. Lecluse, "Exemple d'application de la logique floue : Commande de la température d'un four pilote," *Technique de l'ingénieur*, traité Mesures et Contrôle R7428, juillet 1993.
- [16] J. Botzheim, C. Cabrita, L. T. Keôzy, A. E. Ruano, "Estimating membership Functions Parameters by the Levenberg-Marquardt Algorithm," *Proceedings. 2004 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pp 1666-1672, 25-29 July 2004, Budapest, Hungary.
- [17] A. Boujahia, "Commande floue et neuro-floue appliquées à un robot manipulateur," *Thèse de Magister en Automatique*, EMP Alger, juillet 2000.
- [18] E. V. Broekhoven, B. D. Baets, "A Comparison of Three Methods for Computing the Centre of Gravity Defuzzification," *Proceedings. 2004 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pp 1537-1542, 25-29 July 2004, Budapest, Hungary.
- [19] H. Bühler, "Réglage par logique floue," *Presses polytechniques et universitaires romandes*, Lausanne, 1994.
- [20] C. C. Wong et J. Y. Chen, "Self-generating rule-mapping fuzzy controller desing using a genetic algorithm," *IEE, Proceedings, Control Theory*, vol 149, no2, PP 143-147, March 2002.
- [21] S. M. Ahmad, A. J. Chipperfield et M. O. Tokhi, "Dynamic Modelling of a Two Degree-of-Freedom Twin Rotor Multi-Input Multi-output System," *Proc. IEE United Kingdom Automatic Control Conference (UKACC2000)*, Cambridge, UK, 2000.
- [22] L. Foulloy, S. Galichet et A. Titli, "Commande floue1, de la stabilisation à la supervision," *Lavoisier*, 2003, hermes sciences.
- [23] F.Hachid et F.Farah, "Synthèse et implémentation pratique de lois de commandes non linéaires : Application à un simulateur d'hélicoptère," *Mémoire d'ingénieur D. D. E. ENP. Alger*.
- [24] P.S.Juhng, Y. L. Chi, M.C. Hung, "Evolutionary Design of PID Controller for Twin Rotor Multi-Input Multi-Output System" *PP 913- 917, IEEE, 2000.*
- [25] J.J.Hu, J.P. Su, "Stability Analysis and Controller Design of Twin Rotor MIMO system Using a Fuzzy Lyapunov Variable Structure Approach," *2003.*
- [26] M. Jamshidi, N. Vadiie, T. J. Ross, "Fuzzy Logic and Control, software and hardware Application," © 1993 by PTR Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
- [27] J. S. Jean et H. B. Diab, "Defuzzification Techniques for Fuzzy Controllers," *IEEE Trans on Main, Cyb- part B*, Vol 30, no 1, pp 223-229, 1999.
- [28] B. Kadmiry et D. Driankov, "A fuzzy flight controller combining linguistic and model-based fuzzy control," *Int. J. Fuzzy Sets Syst.*, 2004.

- [29] B. Kadmiry et D. Driankov, "A Fuzzy Gain-Scheduler for the Attitude Control of an Unmanned Helicopter," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 12, no 4, PP 502-515 August 2004.
- [30] R. A. M. Lauchlan, P. Ngamsom, R. Chaloo et S. L. Omar, "Three link planar robotic arm trajectory planning and its adaptive fuzzy logic control," *Intelligent Control Systems Laboratory*. Texas A&M University, Kingsville, Texas 78363. © 1997 IEEE.
- [31] C.C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. Part 1," *IEEE Transactions on systems Man and Cybernetics*, vol 20, pp 404-418 .1990.
- [32] C.C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. Part 2," *IEEE Transactions on systems Man and Cybernetics*, Part B, vol 20, pp 419-435, 1990.
- [33] B.D. Lui, C.Y. Chen, et J.Y. Tsao," Design of Adaptive Fuzzy Logic Controller Based on Linguistic-Hedge Concepts and Genetic Algorithms," *IEEE Transactions on systems Man and Cybernetics, Part B*, vol 31, no1, pp 32-53, 2001.
- [34] Madani Sid ahmed , « La Commande Active D'un Hélicoptère », Memoire comme exigence partielle à l'obtention de la maitrise en genie electrique M.Ing,PP 39. © Sid Ahmed Madani, 2007.
- [35] E.H. Mamdani, S. Assilian," An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller," *International Journal of Man-Machine Studies*, vol 7, no1, pp 1- 13, 1975.
- [36] I. Z. Mat Darus, F. M. Aldebrez et M.O.Tokhi," Parametric Modelling Of A Twin Rotor System Using Genetic Algorithms, " *IEEE British Crown Copyright*, PP 115-118, 2004.
- [37] H. Pomares. I. Rojas, J. Ganzález, M. Damas, B. Pino, A. Prieto,"Online Global Learning in Direct Fuzzy Controllers," *IEEE transactions on Fuzzy Systems*, vol 12, no2, pp 218-228, 2004.
- [38] S. M. Ahmad, M. H. Shaheed, A. J. Chipperfield et M. O. Tokhi,"Nonlinear Modelling of a Twin Rotor MIMO System using Radial Basis Function Networks," *Proc. IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON2000)*, Dayton, Ohio, USA, 10- 12 Oct., pp 313-320, 2000.
- [39] Shiqian.Wu, M. J. Er et Y. Gao,"A Fast Approach for Automatic Generation of Fuzzy Rules by Generalized Dynamic Fuzzy Neural Networks," *IEEE transactions on Fuzzy Systems*, vol 9, no 4, pp 578-594 ,August 2001.
- [40] J.P. Su, C.C. Wang," Fuzzy Gain-Scheduled Integral Control and its Application To a Twin Rotor system," *International Journal of Fuzzy Systems*, vol 2, no3 , September. PP 205-219, 2000.
- [41] J.P. Su, L.T.Chi, M.C. Hung,"Robust Control of a Class of Non-linear System and Its Application to a Twin Rotor MIMO System, " *IEEE ICIT' 02 Industrial technology*, pp 1272-1277,2002.

- [42] C. W. Tao, "A Reduction Approach for Fuzzy Rule Bases of Fuzzy Controller," *IEEE Transactions on systems Man and Cybernetics, Part B*, vol 37, no 5, pp 668-675, October 2002.
- [43] F. C. Teng. A. C. Tsoi, "Fuzzy Controller Based on Mac Vicar Whelan Matrix," *IEEE*, 1994.
- [44] M. O. Tokhi , S. M. Ahmad et A. J. Chipperfield, " Dynamic modelling and Optimal Control of a Twin Rotor MIMO System, " *Proc. IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON2000)*, Dayton, Ohio, USA, 10-12 Oct. pp 391-398, 2000.
- [45] S. K. Tso et Y. H. Fung, "Methodological Development of Fuzzy Logic Controller From Multivariable Linear Control," *IEEE Transactions on systems Man and Cybernetics, Part B*, vol 27, no 3, pp 566-572, June 1997.
- [46] C. C. Wong et J. Y. Chen, " Fuzzy Control of non-linear systems using rule adjustment, " adjustment," *IEE, Proceedings, Control Theory*, vol 146, no 6, PP 578-584, November 1999.
- [47] L.A. Zadeh, "information and control," *Fuzzy Sets*, vol 8, pp 338-353, 1965.
- [48] A.Zapata, R. K. H. Galvão, et T. Yoneyama, " Extracting Fuzzy Control Rules from Experimental Human Operator Data, " *IEEE Trans on Main, Cyb- part B*, vol 29,no 3, pp 398-406,1999.
- [49] Y. S. Zhou et L.Y. Lai, "Optimal Design of Fuzzy Controller by Genetic Algorithms," *IEEE Transaction on industrial applications*, vol 36, no 1. pp 93-97, January- February 2000.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DU
MASTER EN **GENIE ELECTRIQUE**

SPECIALITE : COMMANDE DES SYSTEMES ELECTRIQUES

Proposé et dirigé par : -Mr. ZEGHLACHE Samir.

Présenté par : -Mr. ZAIDI Tariq.

Thème :

COMMANDE FLOUE D'UN SIMULATEUR D'HELICOPTERE TRMS

Résumé :

La dynamique de l'hélicoptère comporte des non-linéarités, des incertitudes paramétriques et est soumis à des perturbations externes inconnus. Ces dynamiques complexes impliquent la conception des algorithmes de contrôle sophistiqués qui peuvent faire face à ces difficultés.

Dans ce travail, un contrôleur logique flou Intégrateur est proposé au TRMS (système MIMO de double rotor) pour résoudre le problème de contrôle. Utilisation de fonctions d'appartenance triangulaires et basée sur une expérience de l'opérateur humain, deux contrôleurs sont conçus pour contrôler la position du lacet et les angles d'inclinaison des TRMS. Les résultats de simulation sont donnés pour illustrer l'efficacité du système de contrôle proposé, ainsi sa robustesse par rapport au système de contrôle classique PID.

Mots clés :

Logique flou intégrateur, TRMS, système MIMO.

N° d'ordre : CSE-09.