



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE 20 AOUT 1955 SKIKDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE PETROCHIMIE

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Filière : Industries Pétrochimiques

Spécialité : Automatisation en Industries Pétrochimiques

Réalisé par :

LOUNISSA Abderraouf

MIHOUB Abdeldjalil

Encadré par :

Dr : MENIGHED Kamel

Programmation floue des gains pour des régulateurs PID décentralisés améliorés : application à un système de deux réservoirs coniques en interaction

Soutenu le : 13-07-2023 devant le jury :

HARZALLAH Ghania	MCB	Président	Université 20 Août 1955-Skikda
MENIGHED Kamel	MCA	Rapporteur	Université 20 Août 1955-Skikda
CHETTAH Chouaib	MCA	Examineur	Université 20 Août 1955-Skikda

Année Universitaire 2022-2023



Remerciements

*Avant tout, nous remercions le bon Dieu **ALLAH** le tout puissant de nous avoir nourries de patience, de volonté et de force pour achever ce travail.*

*Nous souhaitons également exprimer nos gratitudees envers notre encadrant **DR. MENIGHED Kamel**, qui a accepté de superviser ce mémoire et nous a offert des conseils précieux. Votre expertise, votre enthousiasme et votre engagement envers notre réussite ont été une source d'inspiration tout au long de ce processus.*

Nous tenons à remercier sincèrement tous les Professeurs, Enseignant et Formateurs du département de Pétrochimie de l'université de 20 aout 1955 Skikda.

Nous tenons également à exprimer nos reconnaissances envers nos collègues et nos amis qui ont soutenu et encouragé nos efforts tout au long de cette aventure académique. Votre soutien moral et vos discussions enrichissantes ont été d'une valeur inestimable pour nous.

Enfin, nous voudrions exprimer nos gratitudees envers nos familles pour leurs soutiens constants et leurs encouragements indéfectibles tout au long de nos études.

Sans l'aide et le soutien de chacun d'entre vous, l'achèvement de ce mémoire de Master n'aurait pas été possible. Nous sommes reconnaissants pour toutes les opportunités d'apprentissage et de croissance que nous avons eues grâce à vous.



Dédicace

Je dédie ce travail à :

A mes très chers parents qui m'ont tant aidé durant toutes mes études ;

A mes frères et tous les membres de ma famille ;

A mon binôme LOUNISSA Abderraouf qui a travaillé dur pour achever ce mémoire ;

A mes collègues et tous mes amis ;

A tous ceux qui me sont chères ;

Djalil

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

*A mes chers parents pour leur soutien, leur patience, leur
encouragement durant mon parcours scolaire ;*

A mon frère et mes sœurs et tous les membres de ma famille ;

*A mon binôme MIHOUB Abdeldjalil qui a travaillé très dur
pour achever ce mémoire ;*

A tous mes amis et mes collègues ;

A tous ceux qui me sont chères ;

Abderraouf

الملخص: تشير تداخلات النظام متعدد المتغيرات إلى العلاقات المتبادلة والتأثيرات بين المتغيرات المتعددة في نظام معقد. يمكن أن تكون هذه التداخلات خطية أو غير خطية، ويمكن أن تؤثر على السلوك العام للنظام.

الهدف من هذا العمل هو تحسين واستقرار النظام متعدد المتغيرات بعد اللامركزية مع الفصل، فإنه يتطلب استخدام المنظمين.

من بين وحدات التحكم يوجد (PID)، يشكل PID الخاص بنا أساس الضباب المنطقي.

ضباب PID هو طريقة تحكم تعتمد على منطق ضبابي تستخدم خوارزمية لتنظيم النظام عن طريق ضبط القيم النسبية والتكامل والمشتق.

لتحسين الاستقرار والنظام المدروس نستخدم تنفيذ خوارزمية التحكم في الضباب PID باستخدام برنامج MATLAB يتم تفصيل مراحل تحقيق هذا البرنامج وتنفيذه مع عمليات المحاكاة ونتائجها في هذا العمل.

الكلمات المفتاحية: تداخلات، لامركزية، MATLAB.RGA.Découpleurs.PID flou

Résumé : Les interactions des systèmes multi-variables font référence aux relations et aux influences mutuelles entre plusieurs variables dans un système complexe. Ces interactions peuvent être linéaires ou non linéaires, et elles peuvent avoir un impact sur le comportement global du système.

Dans l'objectif de ce travail est d'améliorer et stabiliser le système multi-variables après la décentralisation avec découplage, il nécessite du utiliser des régulateurs. Parmi les régulateurs le plus couramment PID, nous proposons PID à base de la logique floue.

Le PID flou est une méthode de contrôle basée sur la logique floue qui utilise un algorithme pour réguler un système en ajustant les valeurs de la proportionnelle, de l'intégrale et de la dérivée.

Pour stabiliser et améliorer le système étudié, on utilise l'implémentation de l'algorithme de contrôle PID flou utilisant le logiciel MATLAB. Les différentes étapes de réalisation de ce programme et de son implémentation sont détaillées avec les simulations et leurs résultats.

Mots clés : Interaction, décentralisation, PID flou, MATLAB.RGA.Découpleurs.

Abstract : The interactions of multi-variable systems refer to the relationships and mutual influences among multiple variables in a complex system. These interactions can be linear or nonlinear, and they can impact the overall behaviour of the system.

In order to improve and stabilize the multi-variable system after decentralization with decoupling, the use of controllers is necessary. Among the most commonly used controllers is the PID (Proportional-Integral-Derivative) controller, and we propose a fuzzy logic-based PID controller.

Fuzzy PID is a control method based on fuzzy logic that uses an algorithm to regulate a system by adjusting the proportional, integral, and derivative values.

To stabilize and enhance the studied system, the implementation of the fuzzy PID control algorithm using MATLAB software is used. The different steps of developing and implementing this program are detailed, along with simulations and their results.

Keywords : Interaction, decentralisation, Fuzzy PID, MATLAB.Découpleurs,RGA.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre I :Calcul Des Interactions Et Découpleurs	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition de l'interaction dans un système multivariable	3
I.3. Explication du phénomène de l'interaction.....	3
I.4. Quelques méthodes d'analyse des interactions	4
I.4.1. La méthode de RGA (Relative Gain Array).....	5
I.4.1.1. Calcul de RGA pour un système (2×2).....	5
I.4.1.2. Interprétation de la matrice RGA	6
I.5. Les découpleurs.....	7
I.5.1. Commande multivariable.....	7
I.5.2. Quelques méthodes de découplage	9
I.5.2.1. Le découplage idéal	9
I.5.2.2. Le découplage simplifié.....	9
I.5.2.3. Le découplage inversé	10
I.6. Conclusion	15
Chapitre II :Généralités Sur La Logique Floue	
II.1. Introduction	16
II.2. Définition de la logique floue.....	16
II.3. Intérêt et utilisation de la logique floue pour le contrôle.....	17
II.4. Concept de la logique floue.....	18
II.5. Théorie des ensembles Flous	19
II.5.1. Ensemble classique	19
II.5.2. Ensemble flou.....	19
II.5.3. Fonction d'appartenance	19
II.6. Structure d'un système flou	20
II.6.1. Fuzzification	21
II.6.2. Défuzzification	22
II.6.3. Système d'inférence floue	22
II.6.3.1. Types de système d'inférence floue	22
II.7. Contrôleur flou PID	25
II.7.1. Contrôleurs de type d'ajustement flou des gains (fuzzy gain scheduling)	25
II.8. Conclusion.....	26

Chapitre III :PID Classique (Ziegler-Nichols)

III.1. Introduction	27
III.2. La structure du contrôleur PID	27
III.2.1. Le contrôleur P	27
III.2.2. Le contrôleur I.....	27
III.2.3. Le contrôleur D	27
III.3. Techniques d'accordage du PID	28
A. Techniques Classiques.....	28
B. Techniques de calcul ou d'optimisation	28
III.4. Détermination des paramètres de PID avec la méthode de Ziegler-Nichols.....	29
III.4.1. Définition	29
III.4.2. La première méthode.....	29
III.4.3. La deuxième méthode	31
III.5. Conclusion	32

Chapitre IV : Modélisation, Résultats et Discussion

IV.1 Introduction.....	33
IV.2 Le système de deux réservoirs coniques en interaction	33
IV.3 Modélisation de TICTS	35
IV.4 Calcul de RGA et découpleurs.....	36
IV.5. Régulateur PID classique	38
IV.6. Régulateur flou.....	44
IV.6.1. Conception d'un régulateur flou.....	44
A. Schéma du régulateur de Mamdani	44
B. Fonction d'appartenance	45
C. Tableaux des règles floues	48
D. Modèle du régulateur flou sous Matlab/Simulink	51
IV.7. Montage de la boucle de la régulation de TICTS avec régulateur flou	52
IV.8. Résultats de simulation.....	52
IV.9. La comparaison entre les deux régulateurs.....	56
A. Les réponses indicielles.....	56
B. Les erreurs	57
IV.10. Conclusion	58
Conclusion générale	59
Bibliographie.....	61

Liste des figures

Chapitre I : Calcul Des Interactions Et Découpleurs

Figure I.1 : Commande multiboucle.....	4
Figure I.2 : commande multivariable.....	7
Figure I.3 : Commande multivariable avec découplage.	8
Figure I.4 : Schéma fonctionnel d'un système multivariable 2x2 découplée par Découplage simplifié.	10
Figure I.5 : Structure de découplage inversé.....	11
Figure I.6 : Réponse à un échelon de consigne (1,0).....	13
Figure I.7.a : Réponse à l'entrée du procédé (1,0)	14
Figure I.7.b : Réponse à l'échelon de perturbation généralisé à l'entrée du procédé	14

Chapitre II : Généralités Sur La Logique Floue

Figure II.1 : Différentes formes des fonctions d'appartenance.....	20
Figure II.2 : structure générale d'un système flou.	21
Figure II.3.a : Schéma du régulateur de Mamdani Matlab/Simulink.....	24
Figure II.3.b : Modèle du régulateur flou Matlab/Simulink.	24
Figure II.4 : Système de contrôle PID avec un planificateur de gain flou.	26

Chapitre III : PID Classique (Ziegler-Nichols)

Figure III.1 : La structure du contrôleur PID.....	28
Figure III.2 : Courbe de réponse pour la première méthode de Ziegler-Nichols.....	30
Figure III.3 : Le schéma de contrôleur de Ziegler-Nichols.	32

Chapitre IV : Modélisation, Résultats et Discussion

Figure IV.1 : diagramme schématique de deux réservoirs coniques en interaction	34
Figure IV.2 : le schéma du système découplé contrôlé par un PID classique.....	38
Figure IV.3 : Le schéma de contrôleur de Ziegler-Nichols.	39
Figure IV.4 : Schéma d'un PID classique.	39
Figure IV.5.a : le signal d'erreur du sous-système 1.....	40
Figure IV.5.b : le signal de commande du sous-système 1.....	40
Figure IV.5.c : le signal d'erreur du sous-système 2.	41
Figure IV.5.d : le signal de commande du sous-système 2.....	41
Figure IV.6.a : Réponse indicielle du sous-système 1.....	42
Figure IV.6.b : Réponse indicielle du sous-système 2.	42
Figure IV.6.c : Réponse indicielle du sous-système 1 après changement de la consigne.	43
Figure IV.6.d : Réponse indicielle du sous-système 2 après changement de la consigne.	43
Figure IV.6.e : réponse indicielle du g22 sans découplage.	44
Figure IV.7 : Schéma du régulateur de Mamdani sous Matlab/Simulink (FIS).	45
Figure IV.8.a : Fonction d'appartenance de l'erreur.	46
Figure IV.8.b : Fonction d'appartenance de la dérivée l'erreur.	46
Figure IV.8.c : Fonction d'appartenance de k_p	47
Figure IV.8.d : Fonction d'appartenance de k_i	47
Figure IV.8.e : Fonction d'appartenance de k_d	48
Figure IV.9 : Tableau des règles de la logique floue.	50
Figure IV.10 : Visionnage des règles de la logique floue.	51
Figure IV.11 : Modèle du régulateur flou sous Matlab/Simulink.....	51

Figure IV.12 : Schéma de la boucle de la régulation de TICTS avec régulateur flou.	52
Figure IV.13.a : le signal de l'erreur du sous-système 1.	53
Figure IV.13.b : le signal de commande du sous-système 1.	53
Figure IV.13.c : le signal d'erreur du sous-système 2.	54
Figure IV.13.d : le signal de commande du sous-système 2.	54
Figure IV.14.a : La réponse indicielle du sous-système 1.	55
Figure IV.14.b : La réponse indicielle du sous-système 2.	55
Figure IV.15.a : comparaison de la réponse indicielle du sous-système 1 entre les deux régulateurs.	56
Figure IV.15.b : comparaison de la réponse indicielle du sous-système 2 entre les deux régulateurs.	57

Liste des tableaux

Chapitre III :PID Classique (Ziegler-Nichols)

Tableau III.1 : Recette de Ziegler-Nichols-Première méthode. 30

Tableau III.2 : Recette de Ziegler-Nichols-deuxième méthode..... 31

Chapitre IV : Modélisation, Résultats et Discussion

Tableau IV.1 : les valeurs des paramètres du système 34

Tableau IV.2 : Les conditions de fonctionnement et le modèle conventionnel d'espace d'état et la fonction de transfert du TICTS. 36

Tableau IV.3.a : Tableau des règles de la logique floue appliqué dans le contrôleur PID pour k_p 48

Tableau IV.3.b : Tableau des règles de la logique floue appliqué dans le contrôleur PID pour k_i 49

Tableau IV.3.c : Tableau des règles de la logique floue appliqué dans le contrôleur PID pour k_d 49

Tableau IV.4 : les erreurs IAE et ITAE contrôlé par les régulateurs. 57

Liste des abréviations

SISO → Single-Input Single-Output.

PID → Proportional-Integral-Derivate.

MIMO → Multi-Input Multi-Output.

TICTS → Two Interacting Conical Tanks System.

RGA → Relative Gain Array.

RDGA → Relative Dynamic Gain Array.

DRMA → Dynamic Relative Magnitude Array.

FLC → Fuzzy Logic Controller.

COG → Center Of Gravity.

FIS → Fuzzy Inference System.

FGS → Fuzzy Gain Scheduling.

PI → Proportional-Integral.

PD → Proportional-Derivate.

ISE → Integral Square Error.

IAE → Integral Absolute Error.

ITAE → Integral Temporal Absolute Error.

ITSE → Integral Temporal Square Error.

CV → Control Valve.

MV → Manual Valve.

F_{IN} → Flow Input.

F_{OUT} → Flow Output.

TITO → Two-Inputs Two-Outputs.

Introduction

Générale

Introduction générale :

La majorité des systèmes existants dans l'industrie sont des systèmes multi-variables. Ces derniers se caractérisent par les interactions entre ses entrées/sorties, qui influencent naturellement sur la structure et la conception du système de commande ce qui pose donc un problème, qui doit être résolu. Parmi les solutions existantes dans la littérature, on trouve une solution qui consiste à utiliser la technique du découplage qui permet de faire face aux interactions intrinsèques afin d'appliquer une structure de commande décentralisée, en raison des avantages qu'elle offre par rapport la structure de commande centralisée. Parmi ces avantages, citons : la simplicité de mise en œuvre et de maintenance, le maintien de la stabilité

en cas de défaillance d'une boucle (défaillance d'un capteur ou d'un actionneur), la non-propagation des perturbations et la possibilité d'appliquer les techniques de contrôle utilisées dans les systèmes mono-entrée, mono-sortie (en anglais, SISO : Single Input-Single Output), ainsi que les performances que l'on peut atteindre en s'intéressant aux performances de chaque boucle indépendamment des autres... etc.

Parmi les systèmes de commande, on trouve les régulateurs Proportionnel-Intégral-Dérivé (PID) et qui sont largement utilisés dans le milieu industriel [1], [2].

Il faut mentionner, que le PID classique est un régulateur fiable et facile à la mise en œuvre, est amplement utilisé dans de nombreux secteurs industriels tels que : la robotique, l'automatisation des machines, les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation, les colonnes de distillation..., etc. Sa simplicité et son efficacité ont fait de lui un outil de contrôle largement adopté pour réguler les systèmes dynamiques. Cependant, avec l'émergence des techniques de l'approche heuristique (logique floue, réseaux de neurones, etc), il est devenu possible d'améliorer davantage les performances du PID en combinant ses principes fondamentaux avec les techniques de l'approche heuristique.

Par ailleurs, il est important de noter que l'influence des interactions des systèmes multivariables pose des problèmes considérables notamment sur les performances désirées des systèmes corrigés en boucle fermée et ainsi que sur sa stabilisation.

L'objectif de notre travail dans ce manuscrit est de faire en premier temps une recherche bibliographique sur les méthodes de découplage des systèmes multivariables (en anglais MIMO Multi-Input, Multi-Output) afin de surmonter le problème lié aux interactions et ainsi de réduire ou minimiser leurs effets. En d'autres termes, rendre les interactions entre les

Introduction Générale

variables aussi faibles que possible, voire négligeables entre les boucles afin de pouvoir adopter la structure de commande décentralisée (la commande multi-boucle)

Ensuite, il faut stabiliser et corriger les sous-systèmes issus du système global après le découplage. Dans ce travail on va exploiter le régulateur PID, qui sont les régulateurs les plus utilisés dans le milieu industriel.

Dans le présent mémoire, pour le dimensionnement du régulateur PID classique, la méthode de Ziegler-Nichols a été utilisée. Cependant, pour la méthode de la régulation basée sur l'approche heuristique, nous avons utilisé un contrôleur PID-flou qui se base sur la méthode de Mamdani, qui est une technique d'inférence floue la plus couramment utilisée.

Finalement, pour mettre en œuvre la commande multi-boucle, on applique les régulateurs locaux avec un découpleur sur un système multivariables (MIMO) composé de deux réservoirs coniques en interaction (two interacting conical tanks system ; TICTS).

Le sujet que nous avons abordé dans ce manuscrit de mémoire est structuré en cinq chapitres, organisé comme suit :

Le premier chapitre, est consacré à l'explication du phénomène d'interaction, la méthode de la matrice des gains relatifs (en anglais RGA : Relative Gain Array) pour l'analyse des interactions dans un système multivariables et son interprétation.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter la logique floue, la structure d'un système flou surtout l'inférence floue de type Mamdani et le contrôleur PID-flou,

Le troisième chapitre porte sur le contrôleur PID classique et le réglage de ses paramètres avec la méthode de Ziegler-Nichols.

Le quatrième chapitre est dédié à la représentation schématique du système de deux réservoirs coniques en interaction ainsi qu'à sa modélisation mathématique afin d'analyser les interactions via RGA dont l'objectif est de donner la matrice de découplage simplifiée.

Le cinquième chapitre, qui est la dernière partie de notre travail, nous présentons les différents résultats de simulation des régulateurs PID-flou proposé et PID classique que nous avons appliqué sur le système présenté dans le quatrième chapitre, puis de faire une étude comparative des résultats obtenus utilisant ces deux régulateurs.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale tout en proposant des perspectives de travail.

Chapitre I :

Calcul des Interactions et Découpleurs

I.1. Introduction :

Les systèmes de contrôle d'une importance pratique sont souvent multivariables (MIMO). Dans ces systèmes, chaque variable de commande (signal d'entrée) peut influencer plusieurs variables contrôlées (signaux de sortie), ce qui entraîne une interaction entre les boucles d'entrée/sortie. Par conséquent, le contrôle des systèmes multivariables est généralement bien plus complexe que dans le cas d'un système à une seule entrée et une seule sortie (SISO). Il est donc essentiel de quantifier le degré d'interaction afin de former des paires d'entrée/sortie appropriées qui minimisent l'impact de cette interaction. À cette fin, des mesures d'interaction spécifiques peuvent être utilisées [4].

Pour minimiser ces interactions et faciliter le contrôle des systèmes, des différents types de découpleurs sont utilisés.

Dans ce chapitre nous commençons par définir et illustrer le phénomène des interactions dans un système multivariable. Ensuite, les méthodes de découplage des systèmes multivariables les plus rencontrées dans la littérature.

I.2. Définition de l'interaction dans un système multivariable :

L'interaction dans un système multivariable en boucle fermée, c'est l'influence des transmittances tel que la consigne $c_j(s)$ ou la perturbation $z_j(s)$ affecte plusieurs sorties ($y_i(s)$, $i \neq j$) ou alternativement, c'est l'influence des transmittances tel que la sortie $y_i(s)$ est affectée par plusieurs consignes ($c_i(s)$, $i \neq j$) ou plusieurs perturbations $z_j(s)$ [5].

I.3. Explication du phénomène de l'interaction :

Pour bien expliquer le phénomène d'interaction dans un système en boucle fermée, on prend un système multivariable (2×2) de la figure (I.1) : [6]

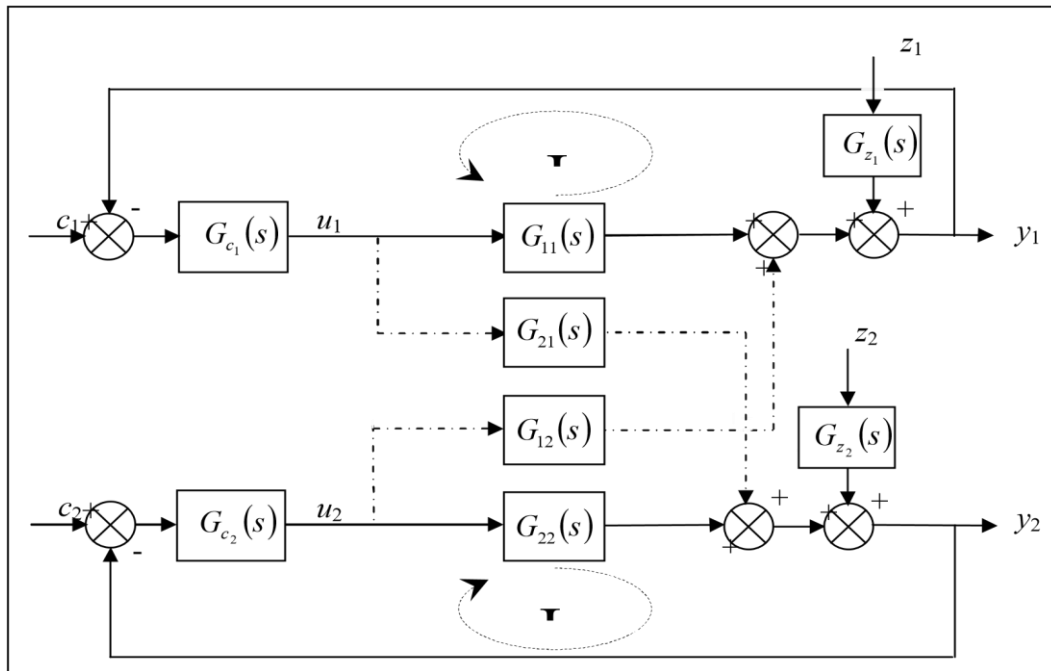


Figure I.1 : Exemple d'une Commande multiboucle [6].

Lorsque la perturbation z_1 affecte la sortie y_1 , cette dernière s'écarte de sa valeur de consigne c_1 , le régulateur $G_{c1}(s)$ génère donc une commande u_1 d'une manière à annuler cet écart (ligne continue). Néanmoins, la commande u_1 générée affecte en plus la sortie y_2 à travers la transmittance $G_{21}(s)$ (ligne discontinue), donc la sortie y_2 s'écarte aussi de sa valeur de consigne c_2 . Ceci oblige le régulateur $G_{c2}(s)$ de générer une commande u_2 pour maintenir la sortie y_2 à la position désirée c_2 . L'action correctrice du régulateur $G_{c2}(s)$ de la deuxième boucle (II) (la commande u_2) affecte aussi la sortie y_1 à travers la transmittance $G_{12}(s)$. Alors le maintien des sorties y_1 et y_2 à leurs positions désirées, en dépit de la perturbation z_1 qui doit être annulé par le régulateur $G_{c1}(s)$, est une tâche ardue.

Par cet exemple, on a montré comment une commande affecte plusieurs sorties et comment une perturbation affectant une sortie se propage dans le système et perturbe d'autres sorties. Cela est dû essentiellement à l'existence des interactions entre les deux boucles (I) et (II) de la configuration de commande.

I.4. Quelques méthodes d'analyse des interactions :

Il existe beaucoup de méthodes d'analyse des interactions comme RGA (Relative Gain Array), RDGA (Relative Dynamic Gain Array), DRMA (Dynamic Relative Magnitude Array) et la méthode du modèle interne (IMC)etc. [4].

Chapitre I : Calcul des Interactions et Découpleurs

Dans notre mémoire on a choisissait la méthode de RGA pour calculer et analyser les interactions à cause de sa simplicité et son utilité.

I.4.1. La méthode de RGA (Relative Gain Array) :

La méthode de RGA a été introduit par Bristol en 1966 comme une mesure des interactions de processus dans les problèmes de contrôle à multi(entrées/sortie). En raison de sa simplicité et son utilité, l'analyse RGA a été largement utilisé pour identifier des systèmes de contrôle à boucles multiples prometteurs basés sur des informations limitées et des gains à l'état stable [7].

Pour un processus MIMO avec « n » variables, le RGA (λ_{ij}) entre la variable contrôlée « y_i » et la variable manipulée « u_j » est définie comme le rapport de deux gains en régime permanent s'exprime comme suit :

$$\lambda_{ij} = \frac{\left(\frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right)_u}{\left(\frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right)_y} \quad (\text{I.1})$$

Le numérateur représente le gain statique en boucle ouverte entre u_j et y_i et le dénominateur c'est le gain statique entre u_j et y_i lorsque les autres sorties sont contrôlées par des correcteurs parfaits. Le gain relatif λ_{ij} indique si le gain d'une boucle ouverte [$u_j - y_i$] change lorsque toutes les autres boucles sont fermées [8].

I.4.1.1. Calcul de RGA pour un système (2×2) :

Le RGA est simplement la matrice qui contient les gains relatifs individuels en tant qu'éléments c.-à-d. $\Lambda = \{\lambda_{ij}\}$, pour un système (2×2) la matrice de RGA est comme ça [9] :

$$\Lambda = \begin{matrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{matrix} \quad (\text{I.2})$$

λ_{11} est calculé comme suit :

$$\lambda_{11} = \frac{k_{11}k_{22}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}} \quad (\text{I.3})$$

Où k_{11} , k_{12} , k_{21} et k_{22} sont calculés comme suit :

$$G(0) = \begin{bmatrix} g_{11}(0) & g_{12}(0) \\ g_{21}(0) & g_{22}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{I.4})$$

Donc la matrice de gain relatif sera :

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \frac{k_{11}k_{22}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}} & -\frac{k_{12}k_{21}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}} \\ -\frac{k_{12}k_{21}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}} & \frac{k_{11}k_{22}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}} \end{bmatrix} \quad (\text{I.5})$$

I.4.1.2. Interprétation de la matrice RGA :

La matrice RGA peut être utilisée comme un guide conduisant à un choix des paires des entrées-sorties où l'effet des interactions entre les différentes variables caractérisant un système est minimale. L'examen des valeurs de ces éléments permet de donner une information sur le niveau d'interaction entre ces variables. L'interprétation des valeurs $(\lambda_{ij}; i=j)$ peut être classée selon les catégories suivantes :

- Si les éléments de la diagonale de la RGA $(\lambda_{ij}; i=j)$ sont proches de 1, alors le niveau d'interaction dans le système est très faible, dans le cas contraire les interactions sont fortes.
- Si les éléments de la RGA sont très grands, cela signifie que le système est très sensible à de faibles variations (erreurs) et donc absolument difficile à contrôler [8].

Les cas suivants peuvent se présenter [4] :

- 1) $\lambda_{ij} = 1$: Il n'y a aucun couplage entre les variables du système. Ou l'interaction n'est Pas dans les deux directions.
- 2) $\lambda_{ij} = 0$: indique qu'il n'y a aucun effet de l'entrée u_j sur la sortie y_i .
- 3) $0.5 < \lambda_{ij} < 1$: Malgré la présence de l'interaction entre les boucles de régulation correspondantes, cette sélection est préférable car elle réduit au minimum les interactions.
- 4) $\lambda_{ij} = 0.5$: Il y a un niveau important d'interaction. Les autres boucles de régulation ont le même effet de l'entrée u_j sur la sortie y_i .
- 5) $\lambda_{ij} > 1$: Il existe un fort couplage entre les boucles de régulation, il doit donc être affaibli. L'instabilité peut se produire si λ_{ij} est trop élevé. Il n'est pas recommandé de contrôler y_i avec u_j .

Chapitre I : Calcul des Interactions et Découpleurs

- 6) $\lambda_{ij} < 0$: il y a de fortes interactions, la réponse de la boucle correspondante peut changer de sens de variation (système à réponse inverse), si les autres boucles sont fermées. En plus la boucle elle-même peut être instable ou le système global devient instable si jamais la boucle considérée s'ouvre, d'où le couple correspondant ne doit pas être choisi dans la configuration de commande.

Exemple :

$$k = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 1.5 \\ 1.5 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{I.6})$$

La matrice RGA est déterminée par l'équation (1.5) :

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 2.29 & -1.29 \\ -1.29 & 2.29 \end{bmatrix} \quad (\text{I.7})$$

L'appariement recommandé est y_1 avec u_2 et y_2 avec u_1 .

I.5. Les découpleurs :

I.5.1. Commande multivariable :

Le réglage des régulateurs distribués et la sélection des bons couples de variables sont loin d'être toujours évidents et ont donné lieu au développement de la commande multivariable. La commande multivariable utilise un régulateur à n_y entrées et n_u sorties pour asservir un procédé à n_u entrées et n_y sorties. Le schéma de la commande multivariable pour un procédé 2 x 2 est illustré à la figure (I.2) : [10]

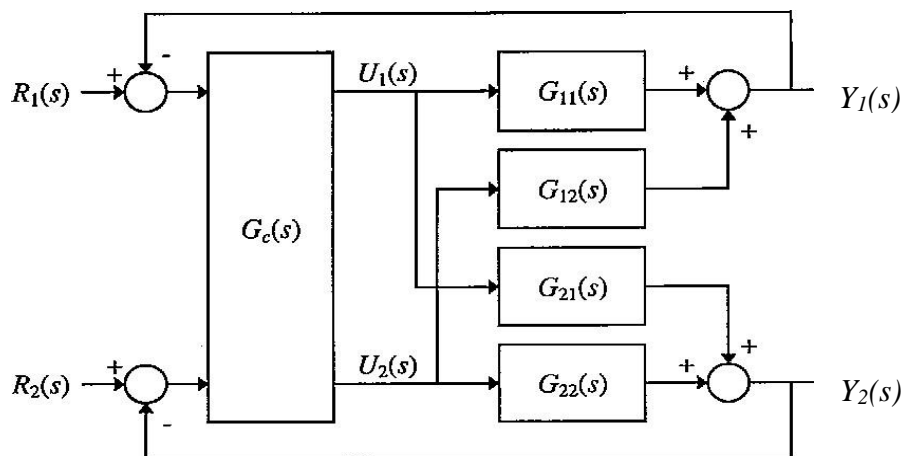


Figure I.2 : commande multivariable [10]

Chapitre I : Calcul des Interactions et Découpleurs

Le découplage algébrique en amont d'un procédé multivariable $G_p(s)$, nécessite la conception d'une matrice de transfert $D(s)$ tel que $D(s)$ en série avec $G_p(s)$ produit une matrice de transfert $T(s)$ diagonale.

$$G_p(s)D(s)=T(s) \quad (\text{I.8})$$

Dans le cas d'un procédé possède deux entrées et deux sorties, il est possible de définir :

$$D(s) = \begin{bmatrix} D_{11}(s) & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & D_{22}(s) \end{bmatrix}, G_p(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (\text{I.9})$$

Et

$$T(s) = \begin{bmatrix} T_{11}(s) & 0 \\ 0 & T_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (\text{I.10})$$

La figure (I.3) montre un système de contrôle, avec découplage en amont d'un procédé possédant deux entrées et deux sorties. La matrice de transfert $G_c(s)$ du contrôleur est diagonale est définie comme suit :

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{c1}(s) & 0 \\ 0 & G_{c2}(s) \end{bmatrix} \quad (\text{I.11})$$

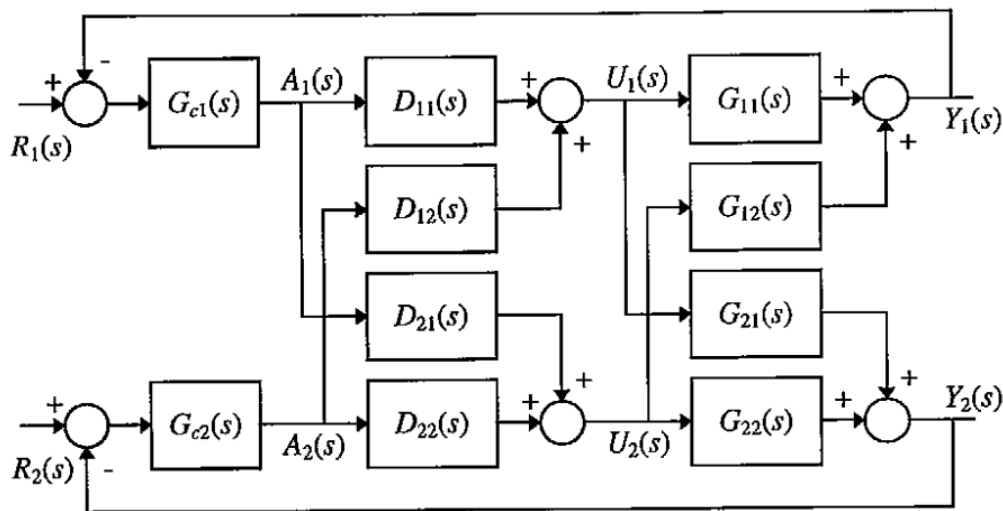


Figure I.3 : Commande multivariable avec découplage [10].

A partir des matrices de transfert de l'équation (I.8) et l'équation (I.9) permet d'obtenir :

$$D(s) = G_p(s)^{-1}T(s) = \frac{1}{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{12}(s)G_{21}(s)} \begin{bmatrix} G_{22}(s)T_{11}(s) & -G_{12}(s)T_{22}(s) \\ -G_{21}(s)T_{11}(s) & G_{11}(s)T_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (\text{I.12})$$

Chapitre I : Calcul des Interactions et Découpleurs

Les termes $G_{11}(s)$, $G_{12}(s)$, $G_{21}(s)$ et $G_{22}(s)$, représentent les fonctions de transfert du procédé. Les termes $T_{11}(s)$ et $T_{22}(s)$ représentent les fonctions de transfert désirées du système découplé en boucle ouverte.

I.5.2. Quelques méthodes de découplage :

I.5.2.1. Le découplage idéal :

Une première méthode pour concevoir un système de contrôle avec découplage consiste à choisir les fonctions de transfert $T_{11}(s)$ et $T_{22}(s)$ sur lesquelles les contrôleurs vont être réglés, puis à calculer à partir de l'équation (1.12) la matrice de transfert $D(s)$ requise pour le découplage.

Un choix judicieux est $T_{11}(s) = G_{11}(s)$ et $T_{22}(s) = G_{22}(s)$. Ce choix permet d'utiliser le même réglage pour la matrice de transfert $G_c(s)$ du contrôleur indépendamment que l'une ou plusieurs des boucles soient en mode manuel. Ce choix appelé « découplage idéal » conduit cependant d'après l'équation (1.12) à des expressions complexes pour la matrice de transfert $D(s)$, qui sont souvent difficiles à réaliser [10].

I.5.2.2. Le découplage simplifié :

Pour faciliter la réalisation de la matrice de transfert $D(s)$, une autre méthode de conception consiste à choisir les éléments de la matrice $D(s)$ et à régler les contrôleurs suivant la matrice de transfert $T(s)$ résultante. Un choix judicieux pour la matrice $D(s)$, appelé "découplage simplifié" et largement utilisé est : [10]

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \\ -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{I.13})$$

On obtient alors :

$$T(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) - \frac{G_{12}(s)G_{21}(s)}{G_{22}(s)} & 0 \\ 0 & G_{22}(s) - \frac{G_{12}(s)G_{21}(s)}{G_{11}(s)} \end{bmatrix} \quad (\text{I.14})$$

Ce choix facilite effectivement la réalisation du système de découplage. Cependant, la matrice de diagonale $T(s)$ obtenue est beaucoup moins intéressante que la matrice diagonale $T(s)$

obtenue dans le cas du "découplage idéal". En effet, la matrice de transfert $T(s)$ de l'équation (1.14) renferme des sommes de fonctions de transfert qui doivent être approximées par des fonctions de transfert plus simples pour permettre le réglage de la matrice de transfert $G_c(s)$ du contrôleur.

La figure (I.4) montre l'utilisation de la structure de découplage simplifié d'un système multivariable [8] :

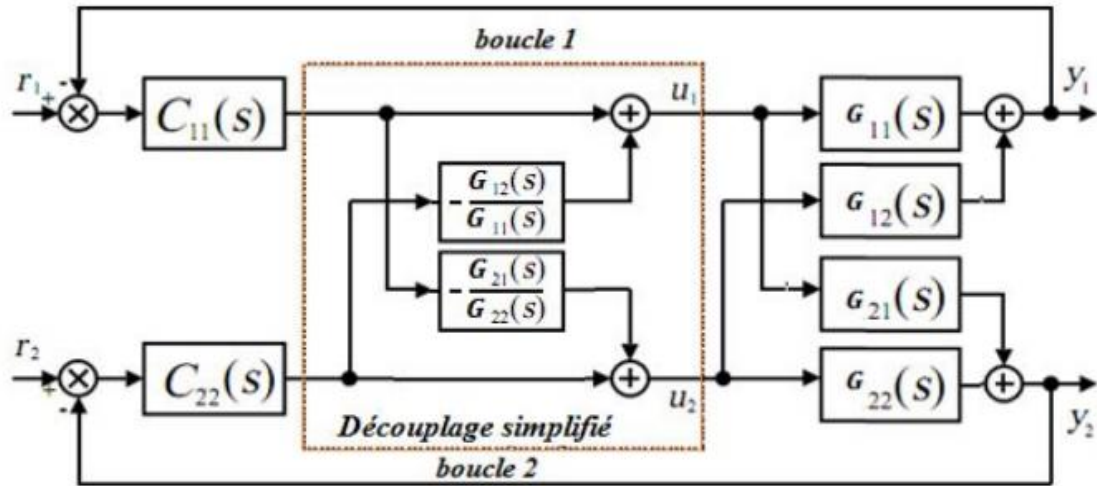


Figure I.4 : Schéma fonctionnel d'un système multivariable 2x2 découpé par Découplage simplifié [8].

I.5.2.3. Le découplage inversé :

Un autre algorithme de découplage largement utilisé, qui peut dériver le même modèle de processus découpé que l'idéal découpleur sans une expression compliquée $D(s)$, est le découplage inversé. Il a été proposé pour la première fois par Shinskey [11] et largement illustré par Wade dans [9]. La figure (I.5) représente la structure du découplage inversé. Le processus de dérivation spécifique peut être trouvé dans [13]. Pour simplifier, $D_{11}(s)$, $D_{22}(s)$ peuvent être fixés à 1, de sorte que $D_{12}(s)$, $D_{21}(s)$ peuvent être obtenus comme suit :

$$D_{12}(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \quad (1.15)$$

$$D_{21}(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)}$$

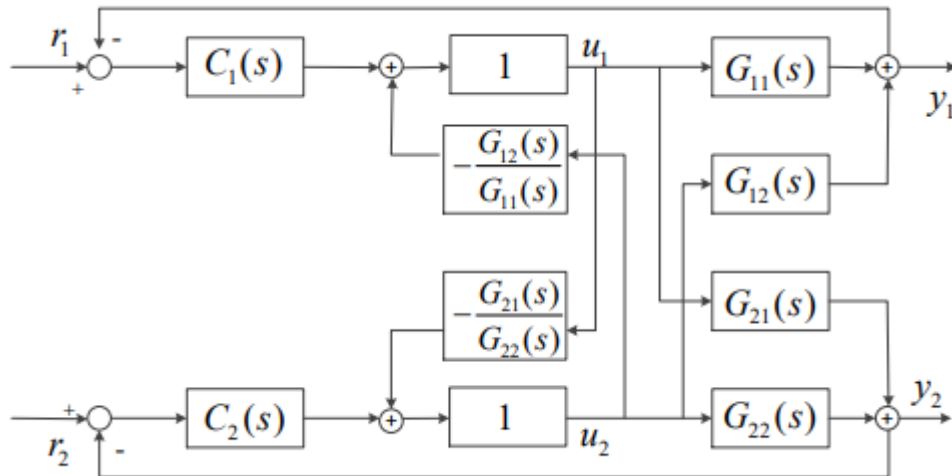


Figure I.5 : Structure de découplage inversé [13]

Le découplage inversé possède la même fonction de transfert découplée que le découplage idéal et la même réalisation pratique que le découplage simplifié. Il devrait donc avoir les avantages des deux méthodes, à savoir le découplage idéal et le découplage simplifié [14]. Par conséquent, trois avantages du découplage inversé sont résumés dans [13] : lorsqu'il est appliqué, le système découplé agit comme s'il n'y avait pas d'interaction entre les différentes boucles de contrôle et les contrôleurs alternatifs sont en mode manuel ; chaque boucle découplée peut être maintenue isolée des autres boucles de contrôle ; il peut être mis en œuvre dans un système de contrôle distribué (DCS) en tant qu'entrée prédictive. De plus, les problèmes d'initialisation et de transition douce ne se poseront pas lors des changements de mode du système.

Il existe certaines considérations importantes dans la conception d'un découpleur qui limite l'applicabilité du découplage inversé à quelques processus. Ces considérations sont les suivantes :

- $-G_{12}(s)/G_{11}(s)$ et $-G_{21}(s)/G_{22}(s)$ doivent être des fonctions strictement propres ou propres.
- Le retard de $G_{12}(s)$ doit être supérieur ou égal à celui de $G_{11}(s)$ et l'ordre de $G_{12}(s)$ doit être supérieur ou égal à celui de $G_{11}(s)$.
- Le retard de $G_{21}(s)$ doit être supérieur ou égal à celui de $G_{22}(s)$ et l'ordre de $G_{22}(s)$ doit être supérieur ou égal à celui de $G_{22}(s)$.

Si ces considérations sont satisfaites par n'importe quelle matrice de transfert de plante, alors seul le découplage inversé peut être utilisé. Pour la compensation du retard temporel, on peut

Chapitre I : Calcul des Interactions et Découpleurs

déterminer un compensateur de retard mort de manière à ce que l'élément diagonal de la plante ait le retard temporel minimum dans sa ligne correspondante. Cette modification utilisée avec le découplage inversé redéfinit son nom en tant que découplage inversé amélioré où une matrice de compensation du retard temporel est utilisée [15].

Dans l'ensemble, le découplage inversé présente plus d'avantages par rapport aux autres schémas de découplage dynamique. Avec ce type de découpleur, certains problèmes tels que l'initialisation, les changements sans à-coup entre les modes manuel et automatique, ainsi que la saturation des variables manipulées, sont plus faciles à résoudre [11].

Exemple [10] :

Soit le procédé où :

$$G_p(s) = \begin{bmatrix} \frac{4}{1+10s} & \frac{3}{1+15s} \\ \frac{3}{1+15s} & \frac{4}{1+10s} \end{bmatrix}$$

Les découpleurs simplifiés sont :

$$D_{11}(s) = D_{22}(s) = 1$$

$$D_{21}(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} = -\frac{3}{1+15s} \frac{1+10s}{4}$$

$$D_{12}(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} = -\frac{3}{1+15s} \frac{1+10s}{4}$$

Les découpleurs sont du type à retard de phase (le pôle est dominant) et n'entraînent donc pas une sortie excessive lors de l'application d'un échelon.

Les fonctions de transfert vues par chacun des contrôleurs sont :

$$G_1(s) = \frac{4}{1+10s} - 2.25 \frac{(1+10s)}{(1+15s)^2}$$

$$G_2(s) = \frac{4}{1+10s} - 2.25 \frac{(1+10s)}{(1+15s)^2}$$

En approximant ces fonctions, on obtient :

$$G_1(s) = G_2(s) \approx 1.75 \frac{(1+35s)}{(1+15s)^2}$$

On constate que la combinaison parallèle de ces deux fonctions fait apparaître un zéro dans le demi-plan de gauche de valeur très importante. Le réglage des régulateurs monovariables est alors réalisé en utilisant de simples PI avec filtres, on obtient :

$$G_{c1}(s) = G_{c2}(s) = \frac{1}{22.5} \frac{(1+22.5s)}{(1+35s)}$$

La réponse à un échelon de consigne est donnée à la figure (I.6). On constate un découplage parfait. La réponse à une perturbation à l'entrée du procédé (1,0) est montrée à la figure (I.7.a). On constate qu'en régulation pour une perturbation à l'entrée du procédé, il est physiquement impossible de découpler le système. La figure (I.7.b) donne la réponse à l'échelon de perturbation généralisé. Pour ce procédé et l'utilisation de régulateurs PID avec filtres, il n'y a pas de limite théorique à l'accélération du procédé.

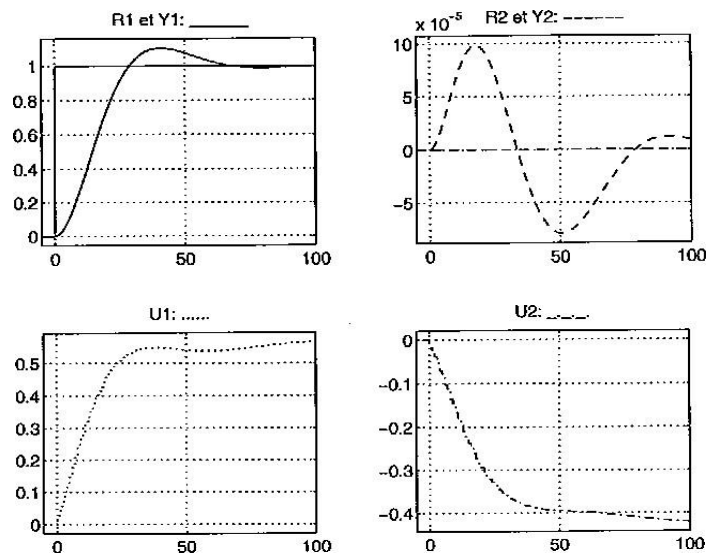
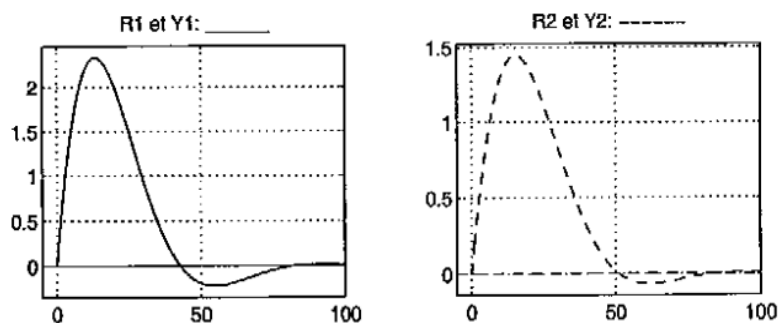


Figure I.6 : Réponse à un échelon de consigne (1,0)



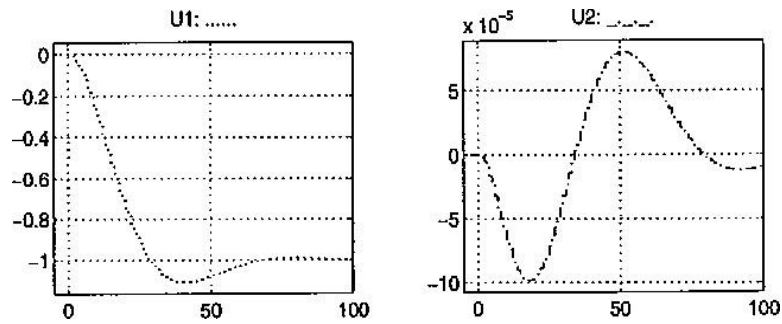


Figure I.7.a : Réponse à l'entrée du procédé (1,0)

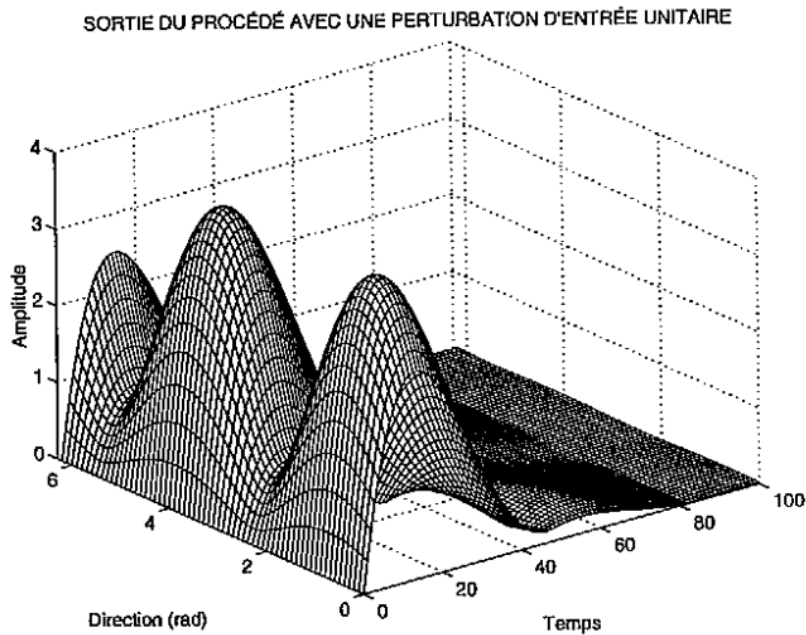


Figure I.7.b : Réponse à l'échelon de perturbation généralisé à l'entrée du procédé

Étant donné que les fonctions de transfert vues par les contrôleurs ne possèdent pas de zéros dans le demi-plan de droite, un découpleur inversé peut-être implanté. Les découpleurs sont donc les mêmes que ceux du découplage simplifié. Le réglage des contrôleurs se fait respectivement sur les fonctions de transfert $G_{11}(s)$ et $G_{22}(s)$. Dans ce cas, un simple PI avec annulation de pôles est utilisé. La valeur du gain est ajustée de façon à satisfaire la dynamique requise. Pour $Kc = 1/Kp$, on obtient une dynamique similaire au procédé en boucle ouverte.

Autre cas :

Étant donné, pour certains procédés, la présence dans les branches directes de retards supérieurs aux branches croisées, la présence de système à déphasage non minimal ou la présence de fonctions de transfert où la différence entre l'ordre du dénominateur et celle du numérateur est supérieure à celle dans les branches croisées, il n'est pas toujours possible de

Chapitre I : Calcul des Interactions et Découpleurs

découpler parfaitement un procédé avec une imposée de découpleurs. Dans ce cas, plusieurs solutions sont possibles.

- L'inversion du procédé.
- Le découplage dans une seule direction.
- Le découplage partiel ou statique.
- Dans le cas d'un retard l'ajout d'un retard dans le découpleur de la branche directe.

Ces cas sont détaillés et expliqués très bien dans [10].

I.6. Conclusion :

Dans ce chapitre on a expliqué d'abord le phénomène de l'interaction dans les systèmes MIMO. Ensuite, on a montré la méthode de RGA pour calculer et analyser les interactions. Finalement on a démontré quelques méthodes de découplage où nous avons commencé par le découplage idéal puis le découplage simplifié et enfin le découplage inversé. Parmi les méthodes de découplage mentionnées on va utiliser la méthode de découplage simplifié dans le 4^{ème} chapitre.

Chapitre II :

**Généralités Sur
La Logique Floue**

II.1. Introduction :

La logique floue, ou plus généralement le traitement des incertitudes, est l'une des classes de l'intelligence artificielle. Elle a pour objet l'étude et la représentation des connaissances imprécises et le raisonnement approché [16]. Elle a été connue en première fois comme une branche mathématique complémentaire à la théorie de la logique classique, puis elle a trouvé sa place parmi les techniques de commande basées sur l'intelligence artificielle. Elle a été conçue au milieu des années soixante à l'université de Berkley en Californie par le professeur Lotfi Zadeh qui a introduit la notion des variables linguistiques et des ensembles flous. La première application expérimentale de cette technique de commande est celle réalisée par Mamdani. La logique floue ne remplace pas nécessairement les systèmes classiques de régulation. Elle est complémentaire et utilisée particulièrement lorsqu'on ne dispose pas de modèle mathématique précis du processus à commander, ou lorsque ce dernier présente de fortes non linéarités ou imprécisions. De plus, l'intérêt de la logique floue réside dans sa capacité de traiter l'imprécis, l'incertain et le vague. Ainsi, le succès de la commande par la logique floue trouve en grande partie son origine dans sa capacité à traduire une stratégie de contrôle d'un opérateur qualifié en ensemble de règles linguistiques facilement interprétables [17,20]. Actuellement la logique floue a trouvé son application dans plusieurs domaines, telles que, la gestion, la médecine et la commande des systèmes. Dans ce dernier domaine d'application, on peut citer la commande des bras robotiques, des machines-outils, des réacteurs chimiques, des véhicules, des appareils électroménagers ...etc.

Dans ce chapitre, on va commencer d'abord par définir la logique floue et donner son intérêt, puis on va expliquer la théorie et la structure de cette logique, et on termine ce chapitre par la définition des contrôleurs PID floue.

II.2. Définition de la logique floue :

La logique floue est une approche mathématique qui permet de modéliser et de raisonner sur des concepts ou des problèmes qui impliquent une certaine incertitude ou une imprécision dans les données. Contrairement à la logique classique, qui se base sur des valeurs binaires (vrai/faux), la logique floue permet de représenter et de manipuler des degrés de vérité, allant de totalement vrai à totalement faux, en utilisant des valeurs continues entre 0 et 1 [18].

Elle trouve des applications dans de nombreux domaines tels que le contrôle automatique, la reconnaissance des formes, la prise de décision, l'intelligence artificielle, etc. Elle permet de traiter des informations vagues ou imprécises et de prendre en compte des

facteurs subjectifs ou linguistiques qui sont difficiles à quantifier avec des méthodes traditionnelles [18].

La logique floue est une extension de la logique booléenne en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, permettant ainsi à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux, la logique floue confère une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes [18,19].

Un ensemble flou F dans l'univers de discours U est caractérisé par sa fonction d'appartenance $\mu_F : U \rightarrow [0, 1]$. L'ensemble flou peut être représenté comme un ensemble de paires ordonnées d'un élément générique u et de sa fonction de degré d'appartenance :

$$F = \{(u, \mu_F(u)) / u \in U\} \text{ [25].}$$

II.3. Intérêt et utilisation de la logique floue pour le contrôle :

➤ Intérêt :

La logique floue trouve son origine dans un certain nombre d'un certain nombre d'observations :

- La connaissance que l'être humain a d'une situation quelconque est généralement imparfaite,
 - Elle peut être incertaine (il doute de sa validité),
 - Ou imprécise (il a du mal à l'exprimer clairement).
- Dans l'industrie ou les techniques, les opérateurs résolvent souvent des problèmes complexes de manière relativement simple et sans avoir besoin de modéliser le système. De même, tout le monde sait qu'un modèle mathématique n'est pas nécessaire pour conduire une voiture et pourtant une voiture est un système très complexe.
- Plus la complexité d'un système augmente, moins il est possible de faire des affirmations précises sur son comportement.

De ces constatations viennent naturellement les déductions suivantes :

- Plutôt que de modéliser le système, il est souvent intéressant de modéliser le comportement d'un opérateur humain face au système ;
- Plutôt que par des valeurs numériques précises, le fonctionnement doit être décrit par des qualificatifs globaux traduisant l'état approximatif des variables [20].

➤ Utilisation pour le contrôle :

La logique floue est bien connue des automaticiens pour ses applications dans le contrôle commande de procédés, appelé alors couramment « contrôle flou ». Tout comme un contrôleur (ou correcteur) classique, le contrôleur flou s'insère dans la boucle de régulation et calcule la commande à appliquer au procédé suivant une ou plusieurs consignes et une ou plusieurs mesures effectuées sur celui-ci. Les bases de règles floues sont intéressantes en commande car elles permettent [20] :

- De prendre en compte une expertise existante de nature qualitative,
- De prendre en compte des variables que l'on sait difficilement intégrer dans la boucle,
- D'améliorer le fonctionnement de contrôleurs classiques, par :
 - Autoréglage hors ligne ou en ligne des gains de ces contrôleurs,
 - Modification de leur sortie (feed forward) en fonction d'événements qui ne peuvent pas être pris en compte par une technique classique.

II.4. Concept de la logique floue :

L'homme perçoit, raisonne, imagine et décide à partir des modèles ou de représentation. Sa pensée n'est pas binaire. L'idée de la logique floue est de capturer l'imprécision de la pensée humaine et de l'exprimer avec des outils mathématiques appropriés. La résolution d'un problème exige la recherche d'un modèle qui est le plus objectif et le plus certain possible. Les modèles de notre cerveau peuvent être assez compliqués et également vagues, flous ou imprécis. L'homme ne raisonne pas comme l'ordinateur : au tout ou rien. La logique floue inspire ses caractéristiques du raisonnement humain. Elle est basée sur la constatation que la plupart de phénomènes ne peuvent être représentés à l'aide de variables booléennes qui ne peuvent prendre que deux valeurs (0 ou 1). En prenons exemple de la taille d'un homme ; peut-on considérer un homme de taille 1.7 m grand ou petit ? N'est-il pas ni vraiment grand, ni vraiment petit ? Pour répondre à ce type de question, la logique floue considère la notion d'appartenance d'un objet à un ensemble, non plus comme une fonction booléenne, mais comme une fonction qui peut prendre toutes les valeurs entre 0 et 1 [21].

En effet, elle caractérise un homme par un degré de vérification ou un degré d'appartenance à "homme de grande taille" compris entre 0 et 1. On peut également définir une fonction "homme de taille moyenne", et une fonction " homme de petite taille" ...etc

II.5. Théorie des ensembles Flous :

II.5.1. Ensemble classique :

En mathématiques, un ensemble classique est une collection d'objets distincts et bien définis, où chaque élément soit appartenir à l'ensemble, soit n'y appartient pas. Dans un ensemble classique, il n'y a pas de degré d'appartenance, un élément est soit membre de l'ensemble, soit non membre [22].

Soient : U représente l'univers du discours, A : un sous-ensemble de U , et μ_A est la fonction d'appartenance de l'ensemble A .

$$\forall x \in U \quad \mu_A(x) = 0 \quad \text{si } x \notin A$$

$$\mu_A(x) = 1 \quad \text{si } x \in A$$

II.5.2. Ensemble flou :

Un ensemble flou est une extension de la notion d'ensemble classique, où les éléments peuvent appartenir à l'ensemble avec une certaine probabilité ou degré d'appartenance. Contrairement aux ensembles classiques, où un élément appartient ou n'appartient pas à l'ensemble, un élément dans un ensemble flou peut avoir un degré d'appartenance compris entre 0 et 1.

Si μ_A est la fonction d'appartenance de l'ensemble flou A et l'élément x appartient à l'ensemble flou A avec un degré d'appartenance [23].

$$\forall x \in U \quad \mu_A(x) \in [0;1]$$

II.5.3. Fonction d'appartenance :

La fonction d'appartenance est une fonction qui attribue un degré d'appartenance à chaque élément par rapport à un ensemble flou. Elle permet de quantifier le degré d'appartenance d'un élément à l'ensemble flou et peut être définie de différentes manières, en utilisant des fonctions telles que gaussiennes, triangulaires, trapézoïdales, etc [24].

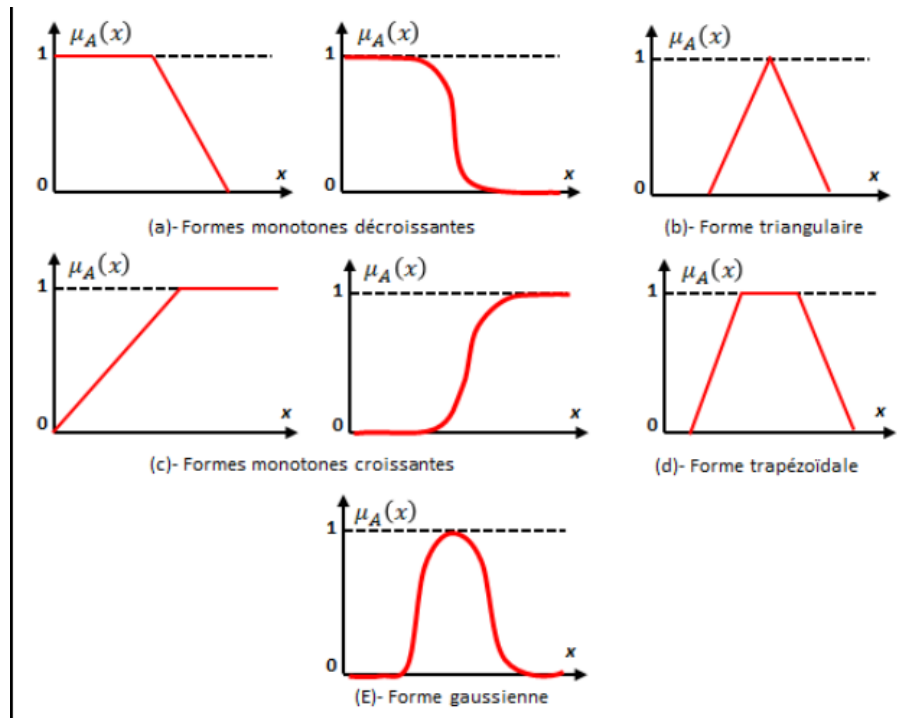


Figure II.1 : Différentes formes des fonctions d'appartenance [24].

II.6. Structure d'un système flou :

Les travaux fondamentaux de L.A. Zadeh (Zadeh, 1973) sur les algorithmes flous ont introduit l'idée de formuler l'algorithme de contrôle par des règles logiques. Un FLC consiste en un ensemble de règles de la forme [25] :

Si (un ensemble de conditions est satisfait) Alors (un ensemble de conséquences peut être induit).

Étant donné que les antécédents et les conséquents de ces règles Si-Alors sont associés à des concepts flous (termes linguistiques), on les appelle souvent des énoncés conditionnels flous. Dans la terminologie des FLC (fuzzy logic controller), une règle de contrôle floue est un énoncé conditionnel flou dans lequel l'antécédent est une condition dans son domaine d'application et le conséquent est une action de contrôle pour le système sous contrôle. Les entrées des systèmes basés sur des règles floues doivent être représentées par des ensembles flous, il est donc nécessaire de rendre flous les entrées précises (fuzzification). De plus, la sortie d'un système flou est toujours un ensemble flou, il est donc nécessaire de la rendre précise (défuzzification) pour obtenir une valeur nette. Les systèmes de contrôle logique flou se composent généralement de quatre grandes parties : une interface de fuzzification, une base de

règles floues, un moteur d'inférence floue et une interface de défuzzification, comme présenté dans la figure (II.2).

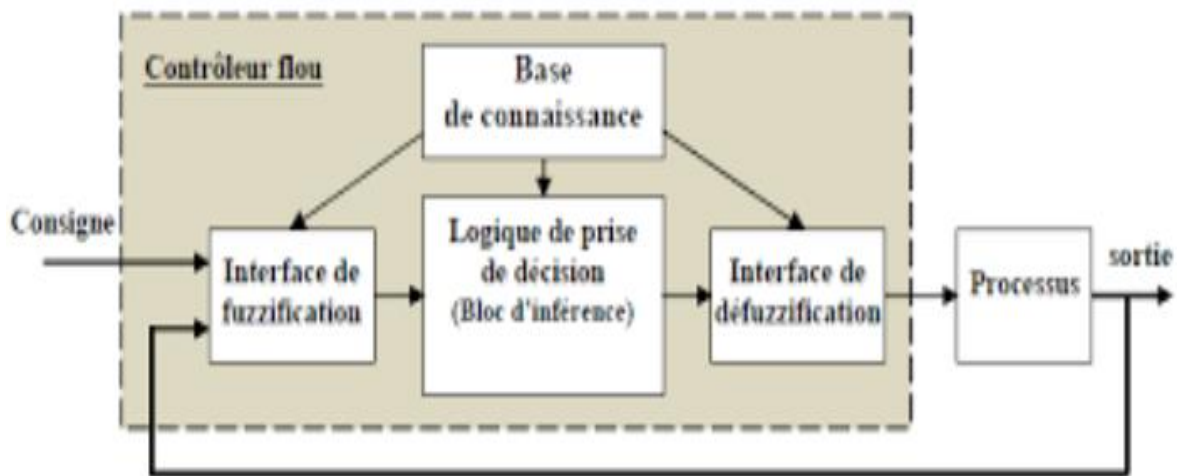


Figure II.2 : structure générale d'un système flou.

II.6.1. Fuzzification :

La fuzzification est un processus dans la théorie des ensembles flous qui consiste à attribuer des degrés d'appartenance à des valeurs numériques ou des variables quantitatives afin de les rendre compatibles avec la représentation floue [24].

La fuzzification est le processus de rendu d'une quantité précise floue. Nous le faisons simplement en reconnaissant que beaucoup des quantités que nous considérons comme précises et déterministes ne le sont en réalité pas du tout ; elles comportent une grande incertitude. Si cette incertitude provient de l'imprécision, de l'ambiguïté ou du flou, alors la variable est probablement floue et peut être représentée par une fonction d'appartenance.

La fuzzification est le processus de conversion de données précises en données floues. C'est une étape fondamentale de la logique floue, un cadre mathématique qui traite de l'incertitude et de l'imprécision. La fuzzification nous permet de représenter et de gérer le flou et l'ambiguïté des données.

Il existe différentes méthodes de fuzzification, dont les plus courantes sont :

- Fuzzification de net à flou.
- Fuzzification de grade d'appartenance.

Les fonctions d'appartenances qui représentent les valeurs linguistiques sont définies en forme triangulaire, trapézoïdales, gaussienne, etc. [26].

II.6.2. Défuzzification :

La dernière étape pour avoir un système flou opérationnel s'appelle la défuzzification. Lors de la seconde étape, on a généré un tas de commandes sous la forme de variables linguistiques (une commande par règle). Le but de la défuzzification est de fusionner ces commandes et de transformer les paramètres résultants en donnée numérique [25].

La méthode de défuzzification la plus populaire est la technique du centroïde. Elle permet de trouver un point représentant le centre de gravité (COG) de l'ensemble flou agrégé A, sur l'intervalle [a, b]. Une estimation raisonnable peut être obtenue en le calculant sur un échantillon de points.

II.6.3. Système d'inférence floue (FIS) :

Le FIS est un système qui met en œuvre des expériences humaines et préférences avec des fonctions d'appartenance et des règles floues. Elle peut être utilisée comme méthodologie générale pour incorporer connaissance, heuristique ou théorie dans les contrôleurs et la prise de décision. Un modèle flou est composé de quatre blocs. Ces blocs sont constitués d'un fuzzifier, d'un défuzzifier, d'un moteur d'inférence et d'une base de connaissances floues.

Fuzzifier décide comment convertir l'entrée nette en un flou entré à utiliser par le moteur d'inférence. Ceci est réalisé par mapper l'entrée nette à un ensemble de fonctions d'appartenance d'entrée stockées dans la base de connaissances. Le moteur d'inférence applique un raisonnement pour calculer la sortie floue en utilisant les règles floues de type «SI-ALORS » qui sont stockées dans la base de connaissances. Il est utilisé pour convertir les entrées floues en entrées floues les sorties. Le défuzzificateur convertit les sorties floues en une valeur nette à l'aide d'une fonction d'appartenance de sortie stockée dans la base de connaissances [26].

II.6.3.1. Types de système d'inférence floue :

Il existe plusieurs types de systèmes d'inférence floue, voici quelques-uns des types de systèmes d'inférence floue couramment utilisés :

A.1. Système d'inférence floue de type Mamdani :

La technique d'inférence floue la plus couramment utilisée est la méthode dite de Mamdani (Mamdani & Assilian, 1975), qui a été proposée par Mamdani et Assilian comme toute première tentative de contrôler une combinaison de moteur à vapeur et de chaudière en synthétisant un ensemble de règles de contrôle linguistiques obtenues auprès d'opérateurs

humains expérimentés. Leur travail a été inspiré par une publication tout aussi influente de Zadeh (Zadeh, 1973). L'intérêt pour le contrôle flou a perduré depuis lors, et la littérature sur le sujet a connu une croissance rapide. Un survol du domaine avec des références assez étendues peut être trouvé dans (Lee, 1990) ou, plus récemment, dans (Sala et al., 2005).

Dans le modèle de Mamdani, l'implication floue est modélisée par l'opérateur minimum de Mamdani, l'opérateur de conjonction est min, la t-norme de la règle de composition est min et pour l'agrégation des règles, l'opérateur maximum est utilisé. Afin d'expliquer le fonctionnement de ce modèle de contrôle flou (FLC) [25].

Cette méthode permet de traduire des règles linguistiques floues en un système de contrôle flou.

Dans la méthode de Mamdani, les règles sont formulées sous forme de "si-alors" linguistiques, où les variables d'entrée et de sortie sont décrites par des ensembles flous. Chaque règle est composée de deux parties : une partie antécédente (IF) qui spécifie les conditions sous lesquelles la règle est applicable, et une partie conséquente (THEN) qui définit la conclusion de la règle.

L'inférence floue dans la méthode de Mamdani repose sur deux opérations principales: la propagation floue et l'agrégation. La propagation floue consiste à évaluer la partie antécédente de chaque règle en utilisant les degrés d'appartenance des valeurs d'entrée aux ensembles flous correspondants. Ces degrés d'appartenance sont ensuite utilisés pour déterminer les degrés d'activation de chaque règle.

La méthode de Mamdani est largement utilisée dans de nombreux domaines d'application, tels que la commande de systèmes, la prise de décision, la modélisation de connaissances, etc. [27].

A.2. Utilisation du Matlab pour la logique floue (Mamdani) :

Matlab est un langage de programmation et un environnement logiciel couramment utilisé pour le calcul numérique et la visualisation scientifique. Il fournit un ensemble complet d'outils pour implémenter divers algorithmes, y compris les contrôleurs de logique floue tels que Mamdani.

En Matlab, vous pouvez utiliser la boîte à outils de logique floue pour concevoir et mettre en œuvre des systèmes flous de type Mamdani. La boîte à outils fournit des fonctions

Chapitre II : Généralités Sur La Logique Floue

pour définir des ensembles flous, créer des systèmes d'inférence flous et simuler des contrôleurs flous.

En combinant les concepts de la logique floue de Mamdani et les capacités de calcul de Matlab, vous pouvez développer des contrôleurs de logique floue puissants pour résoudre des problèmes complexes du monde réel [35].

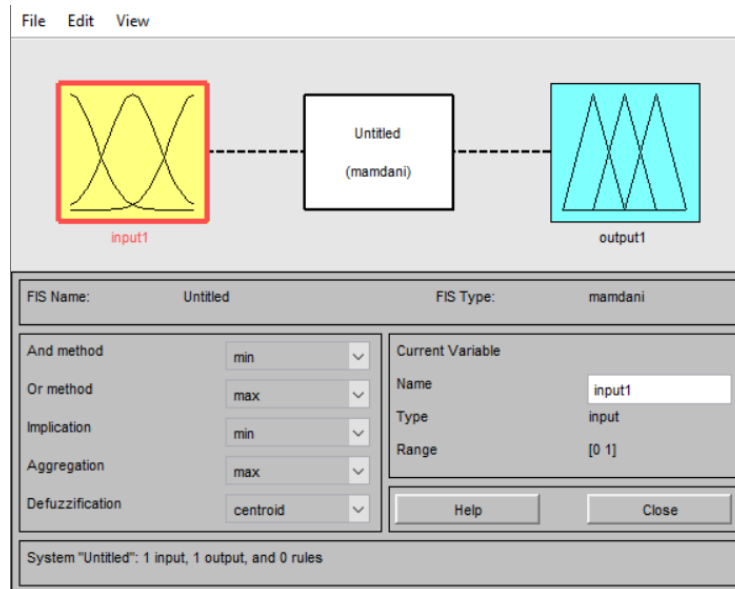
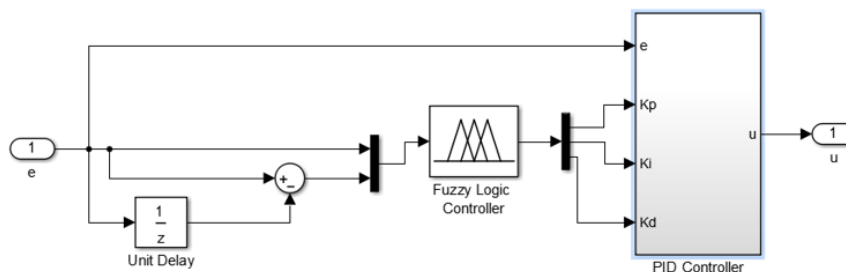


Figure II.3.a : Schéma du régulateur de Mamdani Matlab/Simulink.



FigureII.3.b : Modèle du régulateur flou Matlab/Simulink.

B. Système d'inférence floue de type Takagi-Sugeno :

La méthode de Takagi-Sugeno, également connue sous le nom de modèle Takagi-Sugeno-Kang (TSK), est une approche d'inférence floue utilisée dans les systèmes de contrôle et de modélisation. Elle a été développée par Mamoru Takagi, Michio Sugeno et Genichi Tagaki dans les années 1980 [34].

La méthode de Takagi-Sugeno est une approche d'inférence floue qui permet de modéliser des systèmes complexes en utilisant des règles si-donc floues et des fonctions

mathématiques pour représenter les conséquents des règles. Elle offre une solution flexible pour le contrôle et la modélisation de systèmes incertains ou non linéaires.

II.7. Contrôleur flou PID :

Les contrôleurs les plus connus utilisés dans les processus de contrôle industriel sont les contrôleurs proportionnels-intégraux-dérivatifs (PID) en raison de leur structure simple et de leurs performances robustes dans une large gamme de conditions de fonctionnement. Cependant, le contrôleur PID, étant linéaire, n'est pas adapté aux systèmes fortement non linéaires. Le contrôle flou est souvent mentionné comme une alternative au contrôle PID [28]. La plupart des contrôleurs flous utilisés dans l'industrie ont la même structure que les contrôleurs PI ou PID incrémentaux. La paramétrisation à l'aide de règles et de fonctions d'appartenance floues permet d'ajouter facilement des non-linéarités, de la logique et des signaux d'entrée supplémentaires à la loi de commande [29]. Par conséquent, ces dernières années, les contrôleurs logiques flous (FLC), en particulier les contrôleurs flous PID, ont été largement utilisés dans les processus industriels en raison de leur nature heuristique associée à la simplicité et à l'efficacité pour les systèmes linéaires et non linéaires.

Le premier algorithme de contrôle logique flou implémenté par Mamdani (1974) [27] a été construit pour synthétiser le protocole de contrôle linguistique d'un opérateur humain qualifié. Bien que ce type d'application de FLC ait été réussi par rapport aux contrôleurs classiques, la procédure de conception dépend de l'expérience et des connaissances de l'opérateur et est limitée par l'élucidation des règles heuristiques de contrôle. Afin d'éviter cette difficulté majeure ou cet inconvénient de dépendre de l'expérience de contrôle de l'opérateur, Mac Vicar-Whelan (1976) [30] a proposé pour la première fois quelques règles générales pour la structure des contrôleurs flous. Ces règles floues élaborées par l'approche Mac Vicar-Whelan se rapprochent d'un contrôleur déterministe (PI) ou (PD) lorsque les niveaux de quantification des variables de contrôle et de mesure deviennent infiniment fins [31].

Il y a plusieurs types de contrôleur flou PID comme type d'action direct, type hybride (mixte), type d'ajustement flou des gains (scheduling)... etc.

II.7.1. Contrôleurs de type d'ajustement flou des gains (fuzzy gain scheduling) :

La planification floue des gains (FGS) est un système basé sur des règles pour la planification des gains [32]. Ce type de contrôleur PID flou est composé du système de contrôle PID conventionnel en conjonction avec un ensemble de règles floues (base de connaissances)

Chapitre II : Généralités Sur La Logique Floue

et un mécanisme de raisonnement flou. Les gains PID sont ajustés en ligne en fonction de la base de connaissances et de l'inférence floue, puis le contrôleur PID génère le signal de contrôle.

Au cours de la dernière décennie, plusieurs études ont été publiées dans cette catégorie de contrôleur PID flou. Dans [33], le modèle flou de Takagi-Sugeno [34] est utilisé dans FGS.

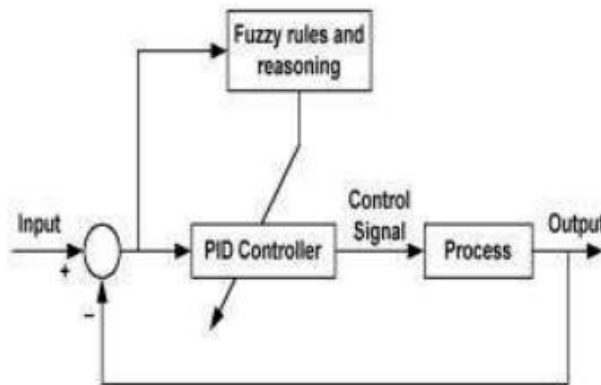


Figure II.4 : Système de contrôle PID avec un planificateur de gain flou.

II.8. Conclusion :

Dans ce chapitre on a expliqué généralement la logique floue, le concept de la logique floue, utilisation et son intérêt. Ensuite on a défini Le théorème des ensembles floues, la structure d'un système flou et le contrôleur flou PID. Parmi les étapes de la structure on a l'inférence floue dans lequel nous allons utiliser le type Mamdani dans le 5^{ème} chapitre .

Chapitre III :

PID Classique

(Ziegler-Nichols)

III.1. Introduction :

Les contrôleurs proportionnels intégraux et dérivés (PID) sont utilisés depuis longtemps dans les applications de contrôle industriel. Les contrôleurs PID remontent aux années 1890 dans la conception des régulateurs de gouverneur [36,37].

Les contrôleurs PID sont probablement les structures de contrôle les plus couramment utilisées dans l'industrie. Cependant, ils présentent certains défis aux ingénieurs en contrôle et instrumentation en ce qui concerne l'ajustement des gains nécessaires pour assurer la stabilité et de bonnes performances transitoires. Il existe plusieurs règles prescriptives utilisées pour l'ajustement du PID. Un exemple est la règle proposée par Ziegler et Nichols dans les années 1940. Ces règles sont en grande partie basées sur des modèles supposés [38].

Le contrôleur PID est ainsi nommé car sa sortie est la somme de trois termes : le terme proportionnel, le terme intégral et le terme dérivé. Chacun de ces termes dépend de la valeur de l'erreur e entre l'entrée et la sortie.

III.2. La structure du contrôleur PID :

Le contrôleur PID est composé de trois éléments : le contrôle proportionnel, le contrôle intégral et le contrôle dérivé [39].

III.2.1. Le contrôleur P :

Ce contrôleur accélère la réponse lorsque la constante de temps en boucle fermée diminue avec le terme proportionnel, mais il ne modifie pas l'ordre du système car la sortie est simplement proportionnelle à l'entrée. Le terme proportionnel réduit mais n'élimine pas l'erreur à l'état stable, ou le décalage.

III.2.2. Le contrôleur I :

Ce contrôleur élimine le décalage car il augmente le type et l'ordre du système de 1. Il augmente également la vitesse de réponse du système, mais au prix d'oscillations soutenues.

III.2.3. Le contrôleur D :

Ce contrôleur réduit principalement la réponse oscillatoire du système. Il ne modifie ni le type ni l'ordre du système et n'affecte pas le décalage.

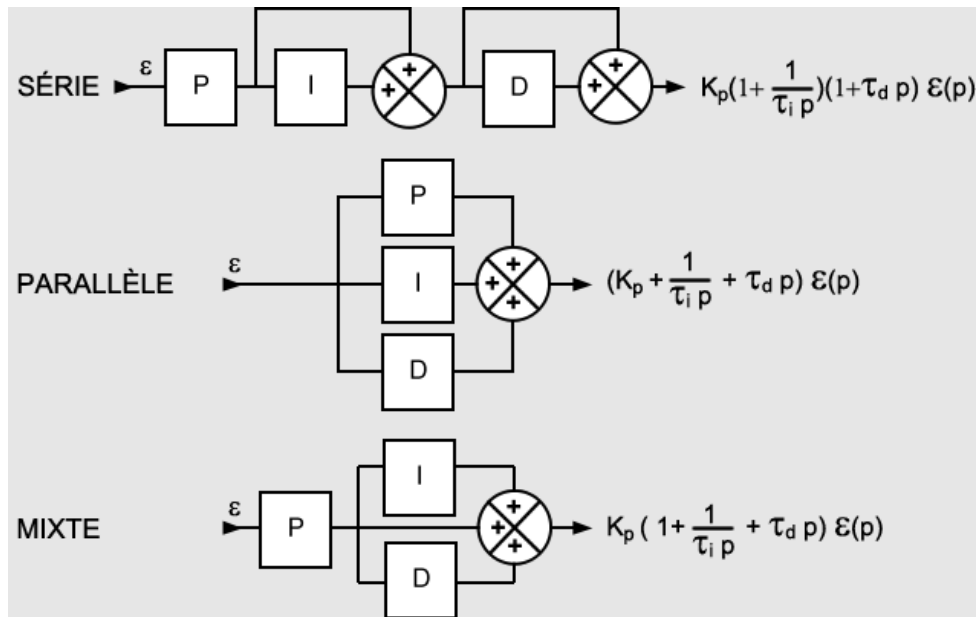


Figure III.1 : La structure du contrôleur PID [39].

III.3. Techniques d'accordage du PID

Il y a eu diverses techniques appliquées pour l'accordage du PID, l'une des premières étant la technique de Ziegler-Nichols. Ces techniques peuvent être largement classées comme des techniques classiques et des techniques computationnelles ou d'optimisation.

La méthode de Ziegler-Nichols, développée par John G. Ziegler et Nathaniel B. Nichols, est une technique classique de réglage des PID. Elle se base sur l'observation de la réponse du système à un échelon de référence pour déterminer les paramètres optimaux du PID [4].

A. Techniques Classiques :

Les techniques classiques font certaines hypothèses sur l'usine et la sortie souhaitée, et tentent d'obtenir analytiquement ou graphiquement une caractéristique du processus qui est ensuite utilisée pour déterminer les paramètres du régulateur. Ces techniques sont calculatoirement très rapides et simples à mettre en œuvre, et sont bonnes pour une première itération. Cependant, en raison des hypothèses formulées, les paramètres du régulateur ne donnent généralement pas directement les résultats souhaités et un réglage supplémentaire est nécessaire [39].

B. Techniques de calcul ou d'optimisation :

Ce sont des techniques qui sont généralement utilisées pour la modélisation des données et l'optimisation d'une fonction de coût, et qui ont été utilisées dans l'accordage du PID.

Les techniques computationnelles ou d'optimisation utilisent des algorithmes et des méthodes d'optimisation pour déterminer les gains optimaux du PID en fonction de critères de performance spécifiques [39].

Les techniques d'optimisation requièrent une fonction de coût qu'elles cherchent à minimiser. Il existe quatre types de fonctions de coût couramment utilisées :

- Erreur absolue intégrale (IAE).
- Erreur quadratique intégrale (ISE).
- Erreur absolue temporelle intégrale (ITAE).
- Erreur quadratique temporelle intégrale (ITSE).

III.4. Détermination des paramètres de PID avec la méthode de Ziegler-Nichols :

Après calculer les erreurs des systèmes, l'étape suivante est de déterminer les paramètres de contrôleur PID. Pour cela des variantes méthodes sont développées dans le domaine de régulation parmi lesquelles est la méthode de Ziegler-Nichols (Ziegler-Nichols tuning).

III.4.1. Définition :

En 1942, Ziegler et Nichols, tous deux employés chez Taylor Instruments, ont décrit des procédures mathématiques simples, respectivement appelées première et deuxième méthodes, pour régler les régulateurs PID. Ces procédures sont désormais acceptées comme norme dans la pratique des systèmes de contrôle. Les deux techniques font des hypothèses a priori sur le modèle du système, mais n'exigent pas que ces modèles soient spécifiquement connus. Les formules de Ziegler-Nichols pour spécifier les régulateurs sont basées sur les réponses à l'échelon du procédé [38].

III.4.2. La première méthode :

La première méthode est appliquée aux plantes ayant des réponses en échelon de la forme affichée dans la Figure (III.2). Ce type de réponse est typique d'un système du premier ordre avec retard de transport, tel que celui induit par l'écoulement de fluide depuis un réservoir le long d'une canalisation. Il est également typique d'une plante composée d'une série de systèmes du premier ordre. La réponse est caractérisée par deux paramètres, L le temps de retard et T la constante de temps. On les trouve en traçant une tangente à la réponse en échelon à son

Chapitre III : PID Classique (Ziegler-Nichols)

point d'inflexion et en notant ses intersections avec l'axe des temps et la valeur à l'état stable. Le modèle de la plante est donc [38]:

$$G(s) = \frac{Ke^{-sL}}{Ts + 1}$$

Ziegler et Nichols ont dérivé les paramètres de contrôle suivants basés sur ce modèle.

Tableau III.1 : Recette de Ziegler-Nichols-Première méthode.

Type de PID	K_p	$T_i = K_p / K_i$	$T_d = K_d / K_p$
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

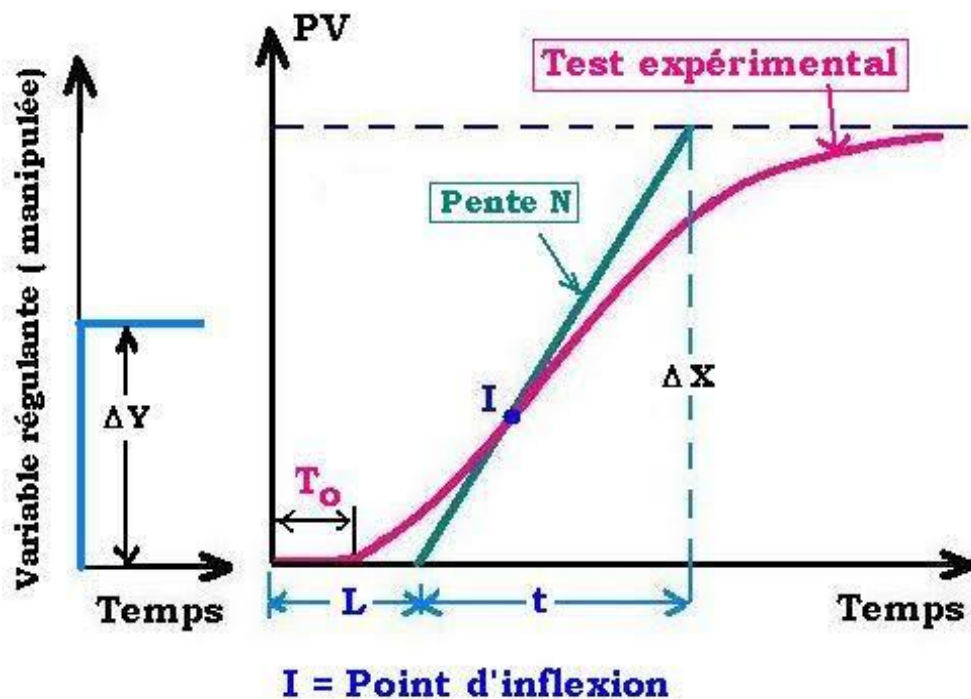


Figure III.2 : Courbe de réponse pour la première méthode de Ziegler-Nichols [38].

Il faut noter que la courbe de réponse de la figure (III.2) est également caractéristique des systèmes du second ordre sur-amortis.

III.4.3. La deuxième méthode :

La deuxième méthode vise les plantes qui peuvent devenir instables sous un contrôle proportionnel. Cette technique est conçue pour obtenir un système en boucle fermée avec un dépassement de 25%. Cela est rarement atteint car Ziegler et Nichols ont déterminé les ajustements en se basant sur un modèle de plante spécifique [38].

Les étapes pour régler un régulateur PID selon la deuxième méthode sont les suivantes :

En utilisant uniquement le contrôle de rétroaction proportionnelle :

- Réduisez les gains de l'intégrateur et du dérivé à 0.
- Augmentez K , de 0 à une valeur critique $K_p = K_{cr}$ à laquelle des oscillations soutenues n'apparaissent pas. Si des oscillations soutenues apparaissent, une autre méthode doit être utilisée.
- Notez la valeur K_{cr} et la période correspondante des oscillations soutenues, P_{cr} .

Les gains du régulateur sont maintenant spécifiés comme suit :

Tableau III.2 : Recette de Ziegler-Nichols-deuxième méthode.

Type de PID	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{1.2}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{2}$	$\frac{P_{cr}}{8}$

Dans le simulink le schéma bloc de Ziegler-Nichols est comme suit :

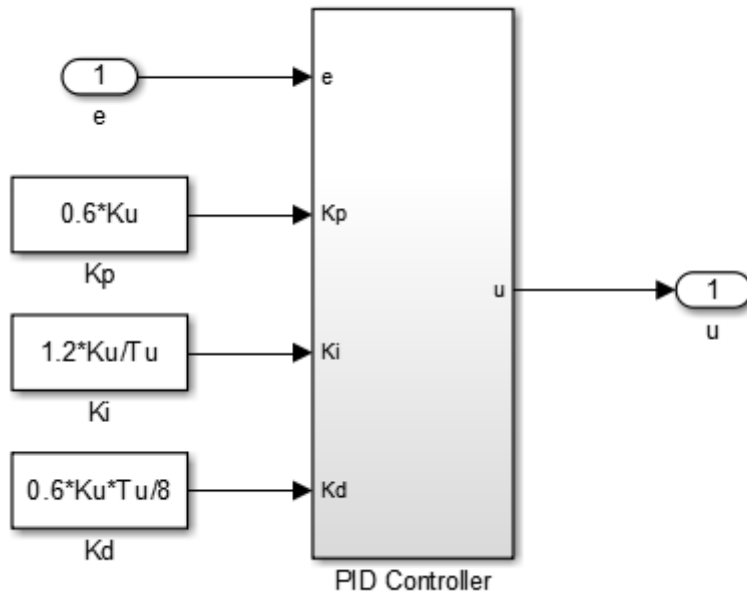


Figure III.3 : Le schéma de contrôleur de Ziegler-Nichols.

III.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a expliqué d'abord la structure du contrôleur PID et le but de chaque action (Proportionnel, Intégrateur et dérivateur). Puis nous avons donné les techniques de calcul ou d'optimisation et les techniques classiques qui sont utilisées pour l'accordage de PID. Finalement on a expliqué les deux méthodes de la détermination de PID de Ziegler-Nichols.

Chapitre IV

Modélisation,

Résultats et

Discussion

IV.1 Introduction :

La modélisation est une étape essentielle dans l'application des méthodes d'analyse des interactions et la synthèse d'un découpleur ou d'un contrôleur pour un système à commander. Elle vise à trouver le modèle mathématique du système, permettant ainsi son étude et sa simulation.

La modélisation mathématique dans le contexte de l'automatisation fait référence au processus de création de représentations mathématiques ou de modèles de systèmes ou de processus physiques qui sont automatisés ou contrôlés par des machines. Ces modèles sont utilisés pour comprendre, analyser et optimiser le comportement et les performances des systèmes automatisés. En formulant des équations mathématiques, des fonctions ou des algorithmes, le comportement du système automatisé peut être simulé, prédit ou optimisé. La modélisation mathématique dans l'automatisation aide à concevoir des stratégies de contrôle, à développer des algorithmes et à prendre des décisions éclairées sur le fonctionnement du système [13].

Dans ce chapitre on va d'abord représenter le système de deux réservoirs coniques en interaction, en anglais (two interacting conical tanks system TICTS) et expliquer son fonctionnement, puis on va modéliser le système et donner le modèle mathématique. Enfin nous allons faire la boucle de système découplé contrôlé avec PID classique et le comparer avec notre régulateur à base de la logique floue.

IV.2 Le système de deux réservoirs coniques en interaction :

Le TICTS, tel qu'illustré à la figure (IV.1), est basé sur le problème de référence des deux réservoirs, utilisé par plusieurs chercheurs.

Le TICTS est considéré comme une configuration pour étudier les schémas de commande rétroactive non linéaires à variables multiples, tant sur le plan théorique qu'expérimental [14]. Le TICTS se compose de deux réservoirs coniques identiques (TANK1 et TANK2), de deux pompes indépendantes (PUMP1 et PUMP2) qui fournissent les débits de liquide F_{IN1} et F_{IN2} avec une tension U_1 et U_2 respectivement à TANK1 et TANK2 à travers deux vannes de contrôle CV_1 et CV_2 . Ces deux réservoirs sont interconnectés au fond par une vanne contrôlée manuellement, MV_{12} , avec un coefficient de vanne β_{12} . F_{OUT1} et F_{OUT2} sont les deux débits de sortie de TANK1 et TANK2 à travers les vannes de contrôle manuel MV_1 et MV_2 avec les coefficients de vanne β_1 et β_2 respectivement. Les coefficients β_{12} , β_1 et β_2 sont

Chapitre IV : Modélisation, Résultats et Discussion

des coefficients réglables représentant la résistance des orifices d'ouverture des vannes respectives.

Le tableau (IV.1) présente les valeurs nominales des paramètres du système.

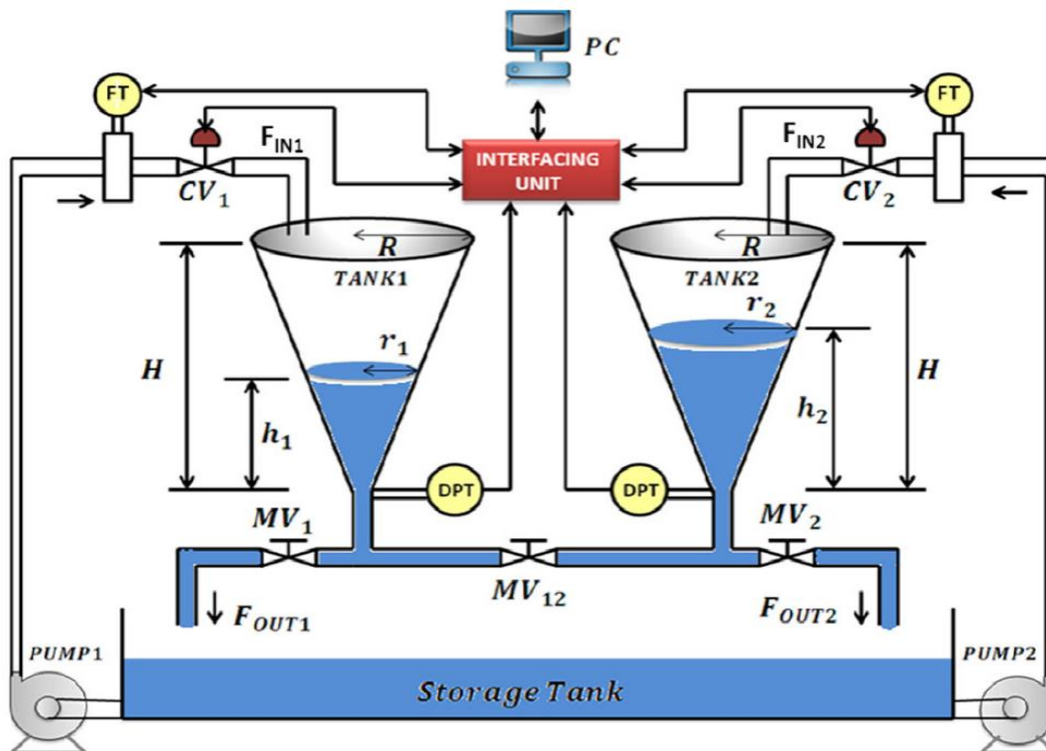


Figure IV.1 : diagramme schématique de deux réservoirs coniques en interaction [14].

Tableau IV.1 : les valeurs des paramètres du système

Le paramètre	Description	valeur
R	Le rayon supérieur du réservoir conique	20 cm
H	La hauteur maximum du réservoir 1 et 2	50 cm
U_1, U_2	Tension d'entrée de la pompe 1 et 2	0-10 v
K_{pp1}, K_{pp2}	Gain de la pompe	$75 \text{ cm}^3/\text{V}\cdot\text{sec}$
β_1	Coefficient de la vanne MV1	$50 \text{ cm}^3/\text{s}$
β_{12}	Coefficient de la vanne MV12	$35 \text{ cm}^3/\text{s}$
β_2	Coefficient de la vanne MV2	$50 \text{ cm}^3/\text{s}$
$\alpha_1, \alpha_{12}, \alpha_2$	Section transversale de tuyau	1.2272 cm^2

IV.3 Modélisation de TICTS :

Dans ce travail, le TICTS est considéré un système TITO (two inputs/two outputs), où h_1 et h_2 la hauteur dans le réservoir 1 (TANK1) et le réservoir 2 (TANK2) sont considérés des variables de sortie et U_1 et U_2 sont les variables manipulées.

On a :

$$\frac{dV}{dt} = F_{IN} - F_{OUT} \quad (IV.1)$$

Et le volume d'un réservoir conique est comme suit :

$$V = \frac{1}{3} \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (IV.2)$$

r : est une variable donc :

$$\tan \theta = \frac{r}{h} = \frac{R}{H} \quad (IV.3)$$

Depuis l'éq (4.3) on trouve :

$$r = \frac{h \cdot R}{H} \quad (IV.4)$$

En substituant l'éq (4.4) dans l'éq (4.2), on obtient :

$$V = \frac{1}{3} \pi \cdot \frac{h^2 R^2}{H^2} h \quad (IV.5)$$

Depuis Bernoulli :

$$F_{OUT} = \beta \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (IV.6)$$

Et on sait que :

$$F_{IN} = K_{pp} U$$

En substituant les équations (IV.5), (IV.6) et (IV.7) dans l'éq (IV.1) on trouve le modèle mathématique du réservoir 1 et 2 comme ça :

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{K_{pp1}U_1 - \beta_1\alpha_1\sqrt{2gh_1} - \text{sign}(h_1 - h_2)\beta_{12}\alpha_{12}\sqrt{2g|h_1 - h_2|}}{\frac{1}{3}\pi R_1^2 \frac{h_1^2}{H_1}} \quad (\text{IV.8})$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{K_{pp2}U_2 - \beta_2\alpha_2\sqrt{2gh_2} + \text{sign}(h_1 - h_2)\beta_{12}\alpha_{12}\sqrt{2g|h_1 - h_2|}}{\frac{1}{3}\pi R_2^2 \frac{h_2^2}{H_2}} \quad (\text{IV.9})$$

Le modèle mathématique obtenu de la modélisation n'est pas linéaire, donc nous pouvons pas le contrôler facilement, cela nous oblige à faire la linéarisation du système.

Les points de fonctionnement et les matrices d'espace d'état obtenus par la linéarisation sont présentés dans le tableau (IV.2) [15].

Tableau IV.2 : Les conditions de fonctionnement et le modèle conventionnel d'espace d'état et la fonction de transfert du TICTS.

Points de fonctionnement	Espace d'état	La matrice de transfert G(s)
$U_{1s}=4.5$ $U_{2s}=2.1$ $h_{1s}=10.1$ (5-15) $h_{2s}=8.1$	$A = \begin{bmatrix} -0.22 & 0.13 \\ 0.21 & -0.35 \end{bmatrix}$ $B = \begin{bmatrix} 0.49 & 0 \\ 0 & 0.75 \end{bmatrix}$ $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ $D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{0.49s + 0.17}{s^2 + 0.568s + 0.048} & \frac{0.10}{s^2 + 0.568s + 0.048} \\ \frac{0.10}{s^2 + 0.568s + 0.048} & \frac{0.75s + 0.16}{s^2 + 0.568s + 0.048} \end{bmatrix}$

IV.4 Calcul de RGA et découpleurs :

Depuis les équations (1.2) et (1.5) du premier chapitre on a obtenu la matrice des gains relatifs comme suit :

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 2.42 & -0.89 \\ -0.89 & 2.42 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.10})$$

On voit que λ_{11} et λ_{22} sont supérieurs à 1, ainsi que λ_{12} et λ_{21} sont inférieurs à 0, donc il y'a une forte interaction (couplage).

Chapitre IV : Modélisation, Résultats et Discussion

Pour minimiser ces interactions et faciliter le contrôle on a choisi d'ajouter un découpleur simplifié dans notre système.

La méthode de découplage simplifié est expliquée dans le premier chapitre, la matrice de découpleur $D(s)$ est comme suit :

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \\ -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.11})$$

Depuis l'équation 4.11 la matrice de découplage de notre système est comme suit :

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{0.10}{0.49s + 0.17} \\ -\frac{0.10}{0.75s + 0.16} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.12})$$

IV.5. Régulateur PID classique :

Voici notre système avec le découplage simplifié dans le **figure (V.1)** :

- Les fonctions de transfert du système sont g_{11} , g_{12} , g_{21} et g_{22} .
- d_{12} , d_{21} sont les découpleurs de notre système.
- Le bloc en rouge représente le PID classique.

Les figures (V.2) et (V.3) montre la structure du régulateur classique.

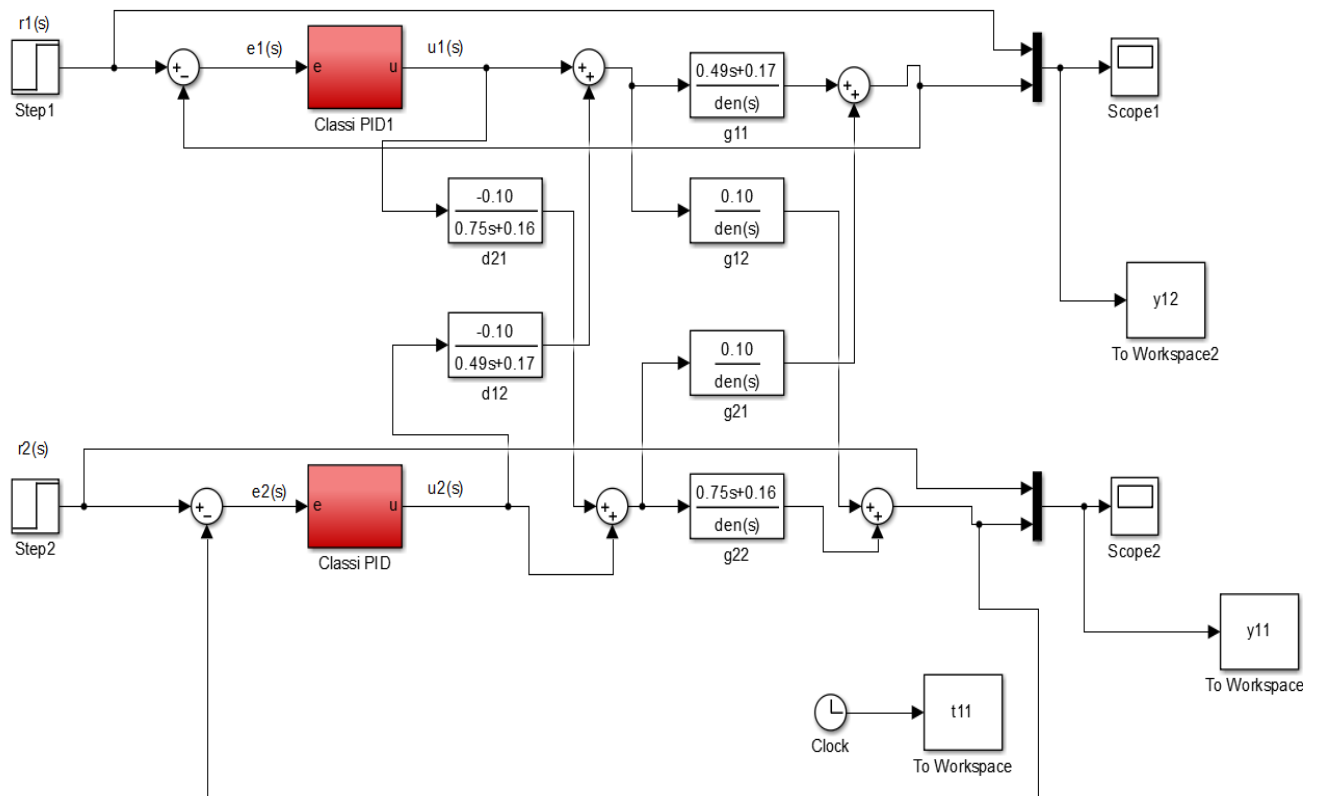


Figure IV.2 : le schéma du système découplé contrôlé par un PID classique.

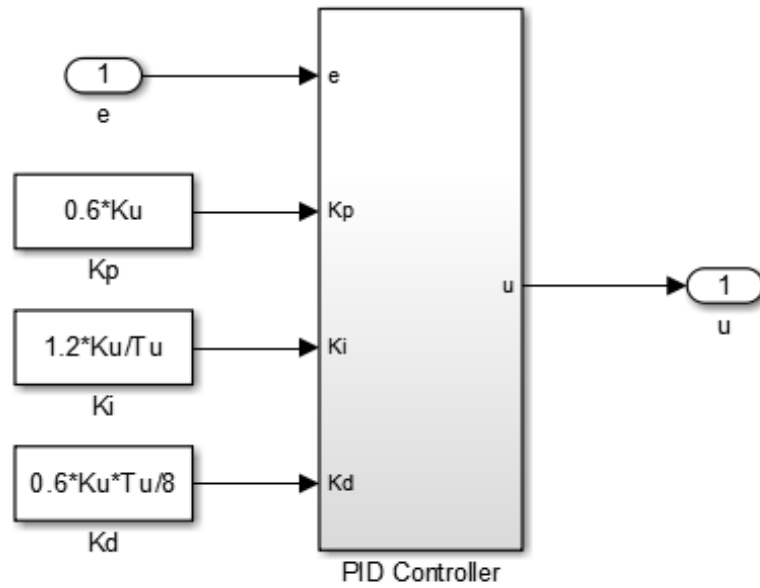


Figure IV.3 : Le schéma de contrôleur de Ziegler-Nichols.

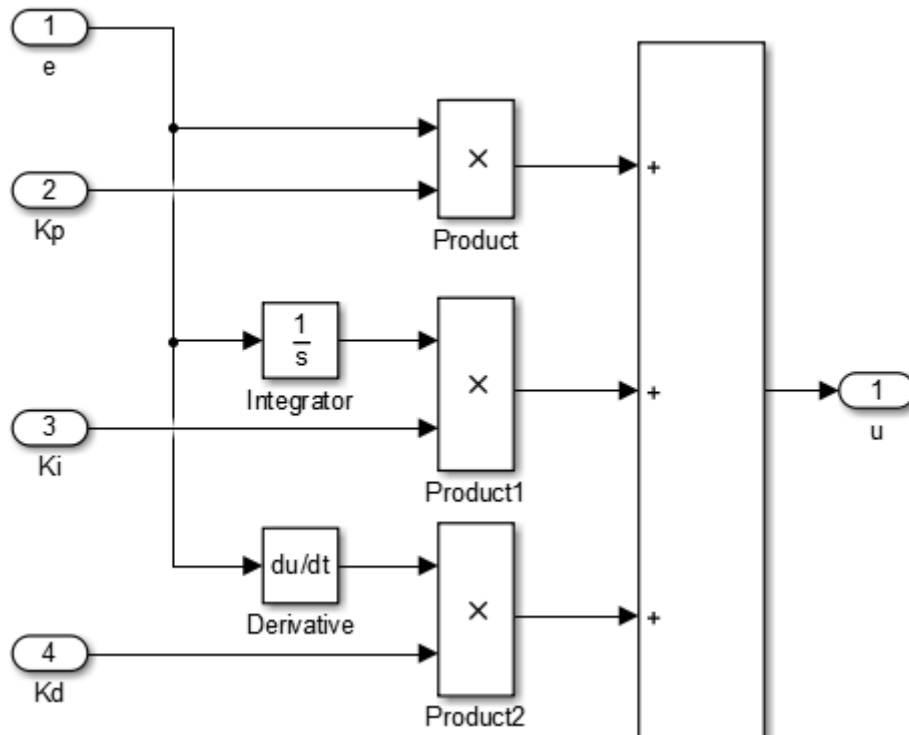


Figure IV.4 : Schéma d'un PID classique.

Les signaux de l'erreur du sous-système 1 et 2 et les signaux de commande sont montrés dans les figures suivantes.

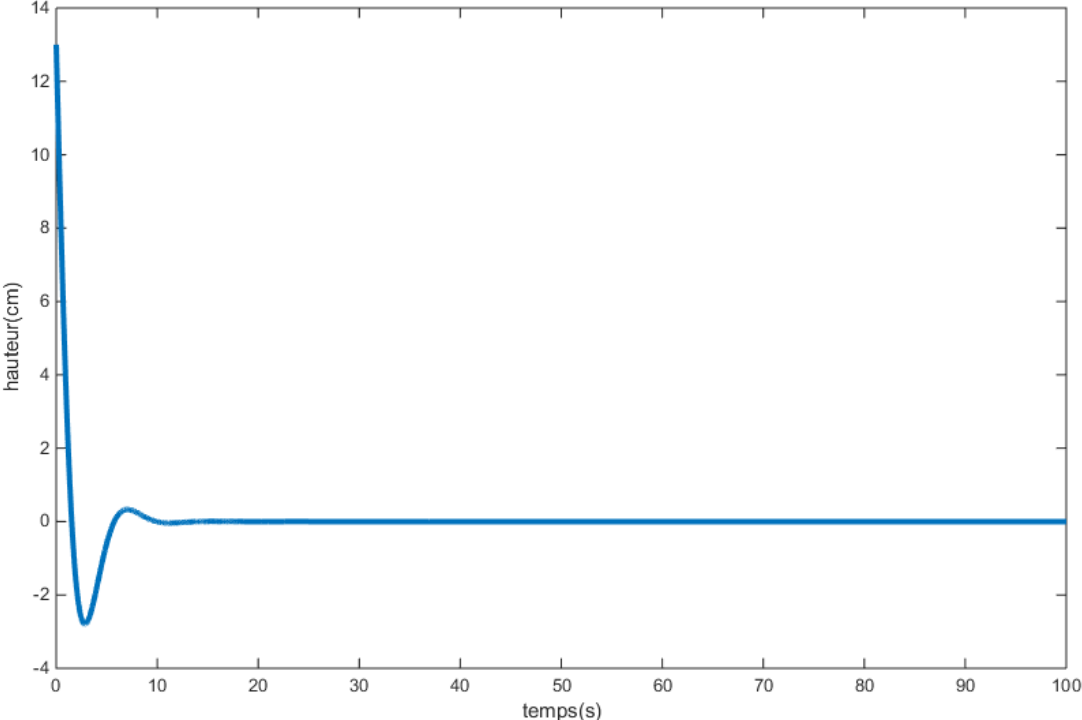


Figure IV.5.a : le signal d'erreur du sous-système 1.

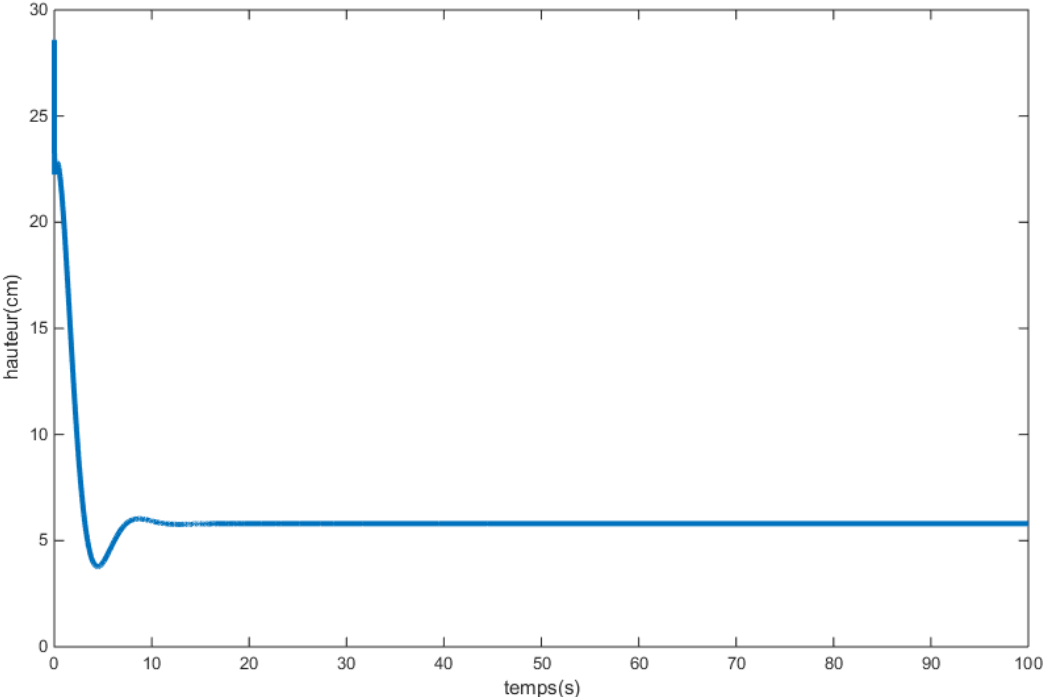


Figure IV.5.b : le signal de commande du sous-système 1.

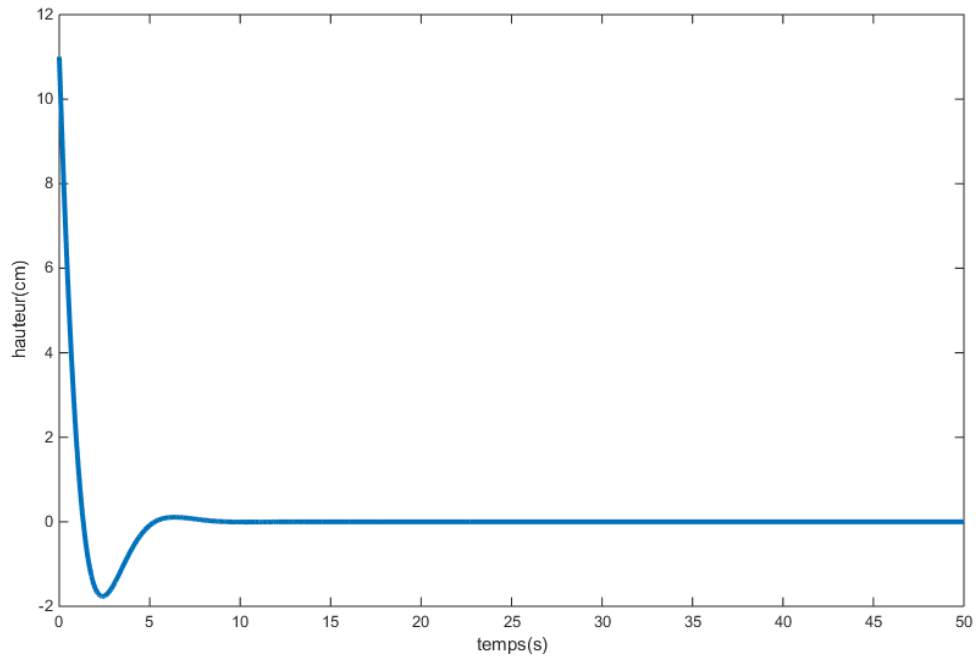


Figure IV.5.c : le signal d'erreur du sous-système 2.

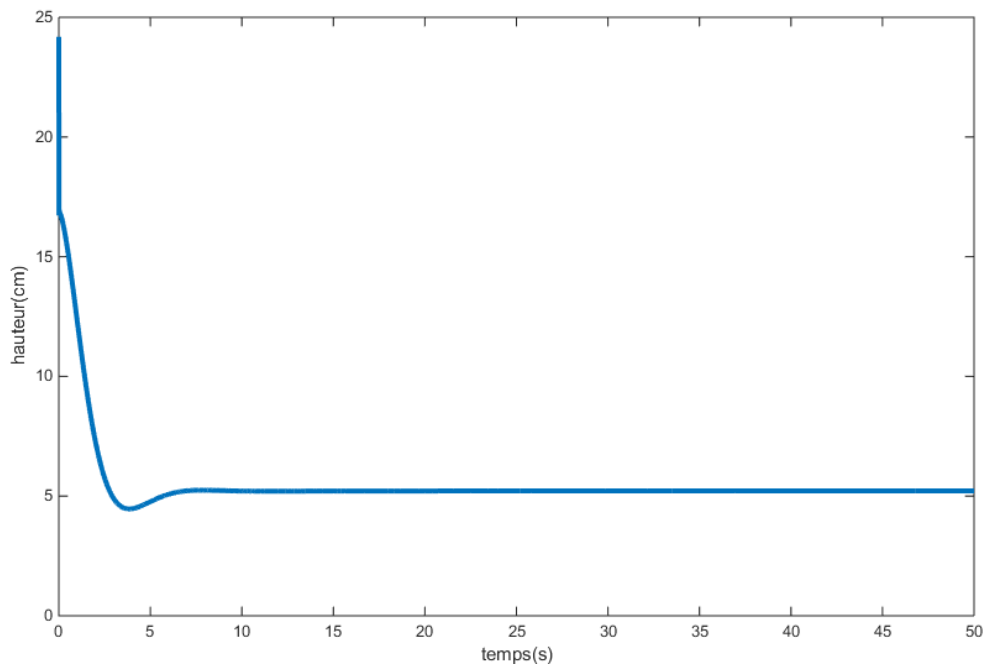


Figure IV.5.d : le signal de commande du sous-système 2.

En observant les figures au-dessus on peut constater que les résultats sont toujours satisfaisants. L'erreur de position tend vers zéro en régime permanent en temps court.

Les résultats obtenus de la simulation de notre système de deux réservoirs coniques découplé sont montrés dans les figures (IV.6.a) et (IV.6.b).

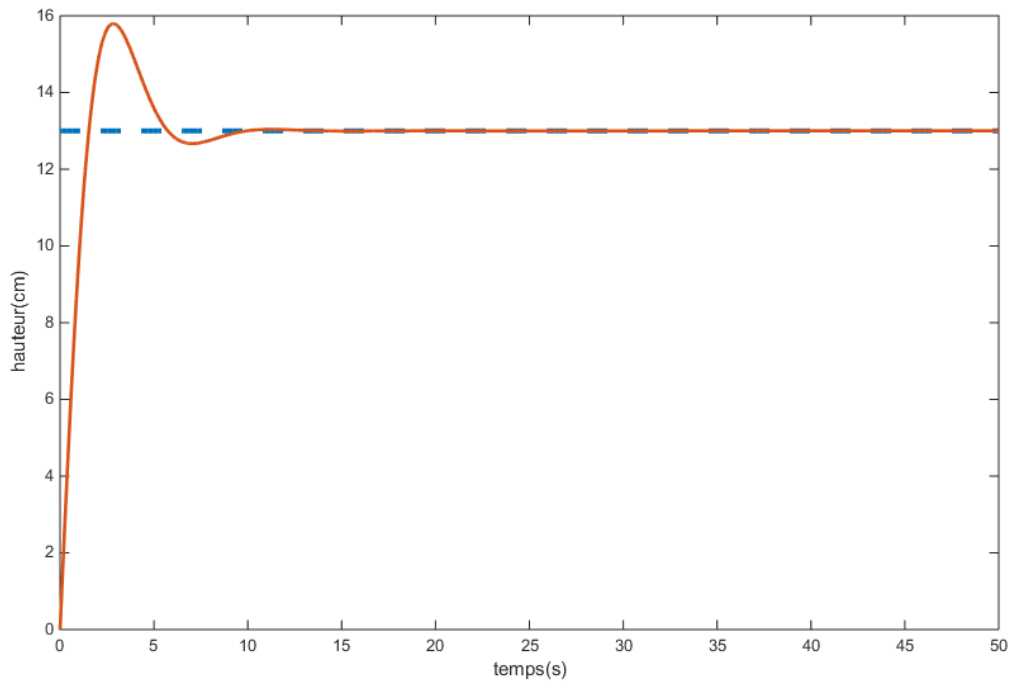


Figure IV.6.a : Réponse indicielle du sous-système 1.

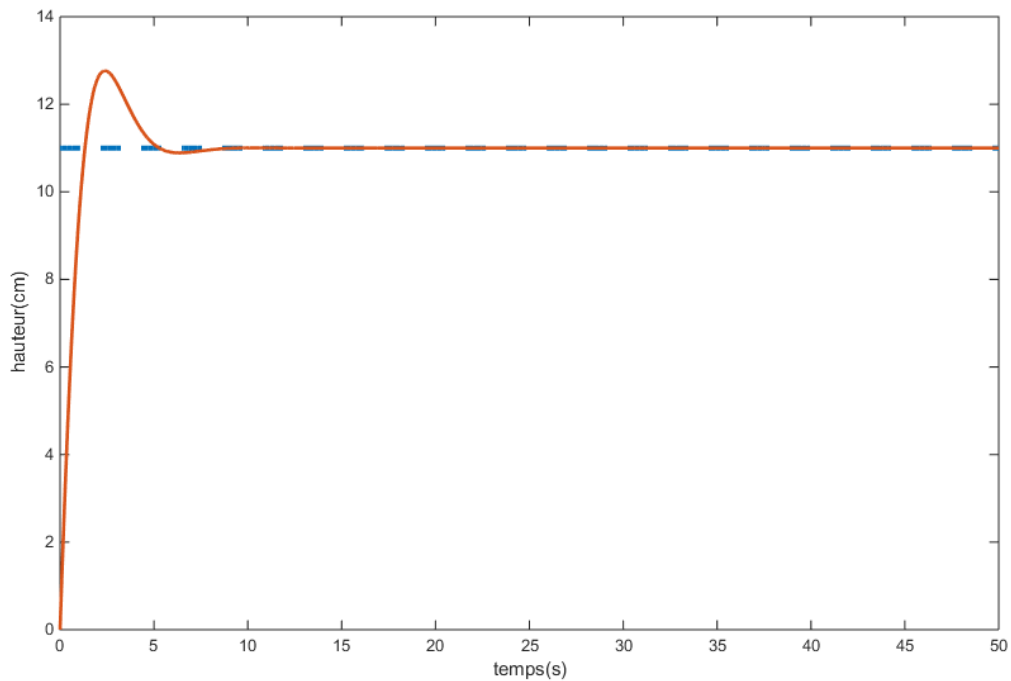


Figure IV.6.b : Réponse indicielle du sous-système 2.

Si on change la consigne 1 (l'entré1) n'affecte pas la deuxième sortie à cause de découpleur introduit comme illustré dans les figures (IV.6.c) et (IV.6.d).

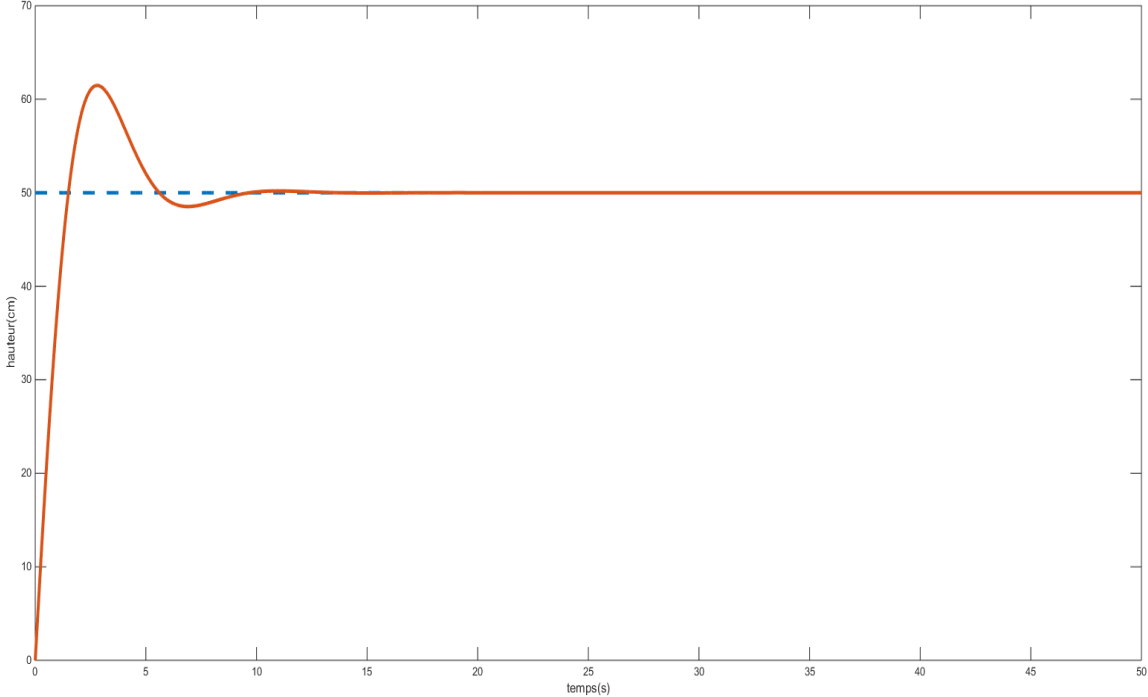


Figure IV.6.c : Réponse indicielle du sous-système 1 après changement de la consigne.

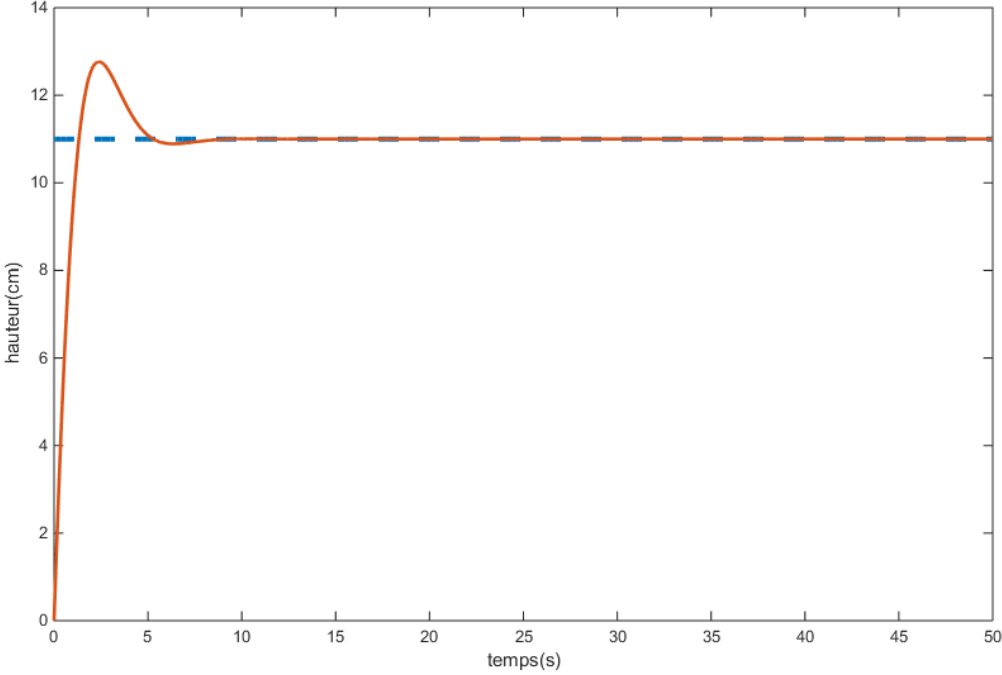


Figure IV.6.d : Réponse indicielle du sous-système 2 après changement de la consigne.

Maintenant on a essayé le système sans découplage, il a donné le résultat dans la figure (V.5.e) ci-dessous.

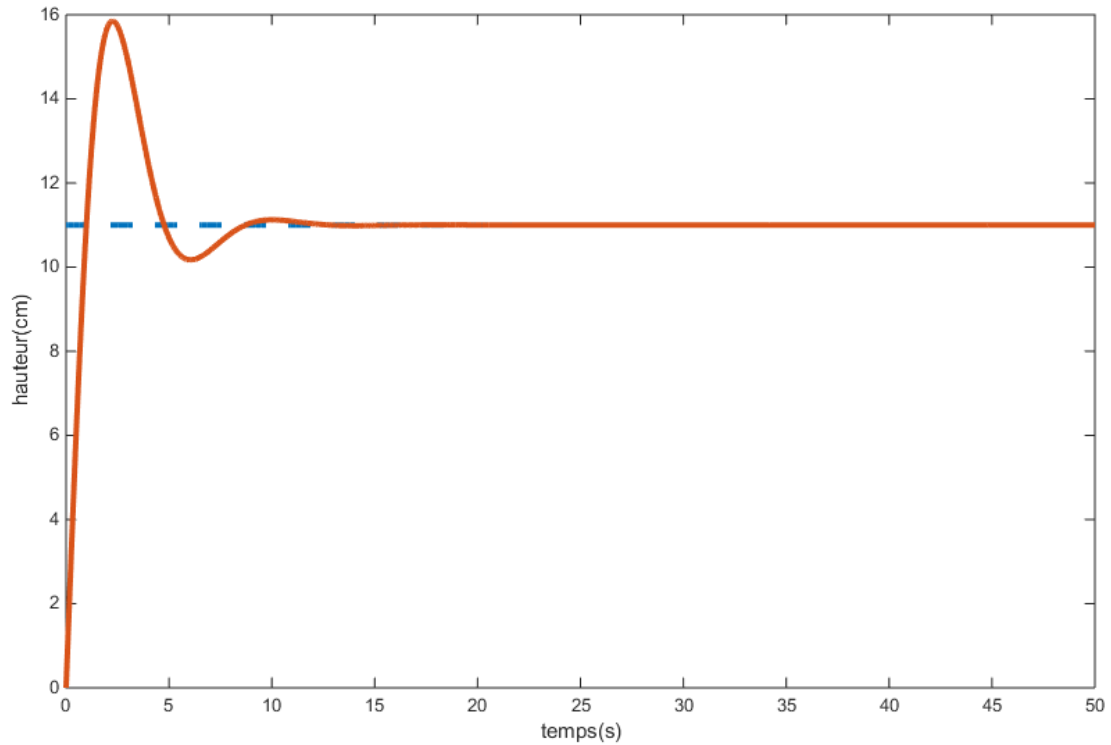


Figure IV.6.e : réponse indicielle du g22 sans découplage.

Comme il est montré dans la figure (IV.6.e) la consigne 1 affecte la deuxième sortie si le système n'est pas découplé.

IV.6. Régulateur flou :

IV.6.1. Conception d'un régulateur flou :

A. Schéma du régulateur de Mamdani

Dans cette partie de notre travail, nous allons concevoir un régulateur de niveau(TICTS) à base de la logique floue. La conception de ce régulateur par Matlab/Simulink est réalisée de la même manière de tous les systèmes à base de la logique floue. Pour cela, on commence à taper la commande 'fuzzy' à la ligne de commande apparue dans la fenêtre de Matlab/Simulink. On obtient alors la fenêtre FIS Editor de Matlab/Simulink, comme illustrée à la figure (V.6).

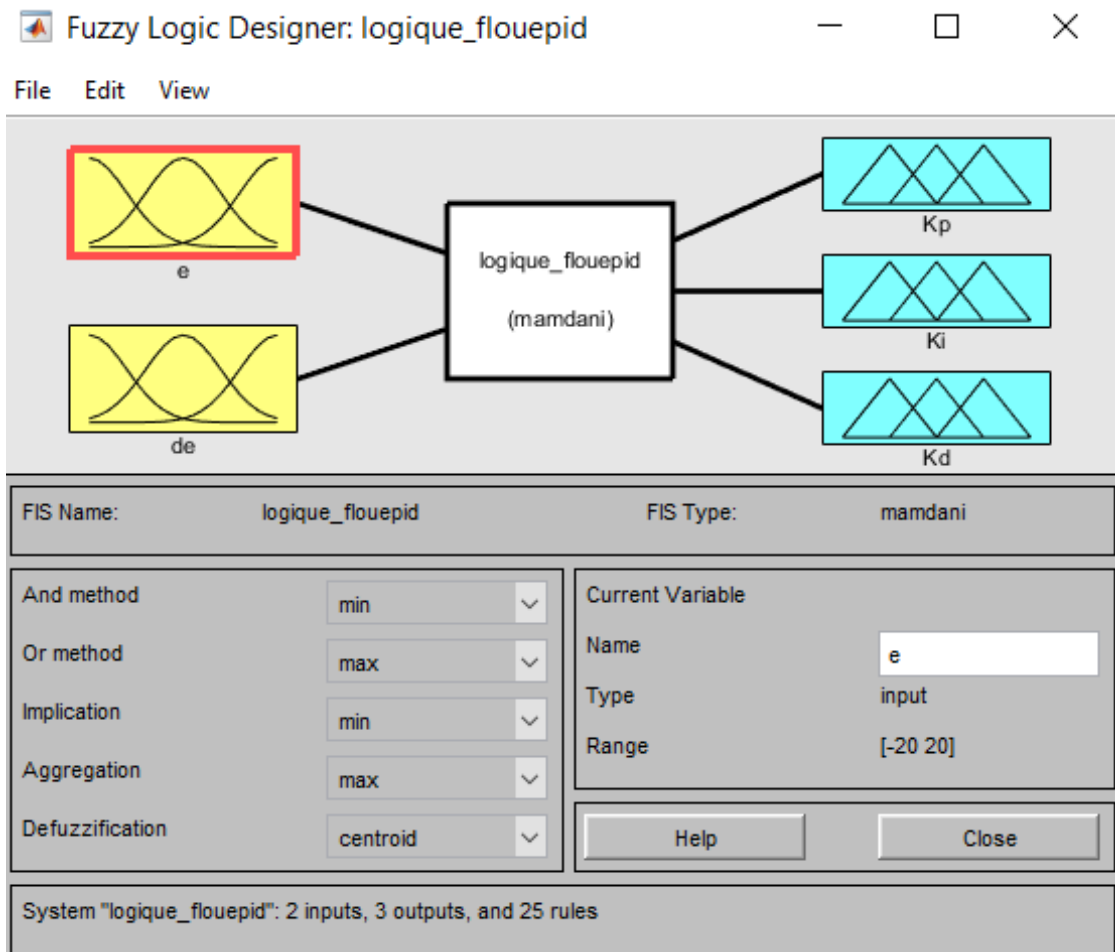


Figure IV.7 : Schéma du régulateur de Mamdani sous Matlab/Simulink (FIS).

B. Fonction d'appartenance :

Pour la conception de notre régulateur flou, on va exploiter cinq variables, l'erreur (notée e), l'entrée du régulateur flou (E), mais aussi la dérivée de l'erreur (notée Δe) et les sorties (k_p , k_i et k_d).

Les fonctions d'appartenance pour les entrées et les sorties du régulateur flou sont présentées dans les figures (IV.8.a, IV.8.b, IV.8.c, IV.8.d et IV.8.e).

L'erreur (e) du régulateur flou a été partitionnée 5 valeurs linguistiques dans un intervalle de $[-20 : 20]$.

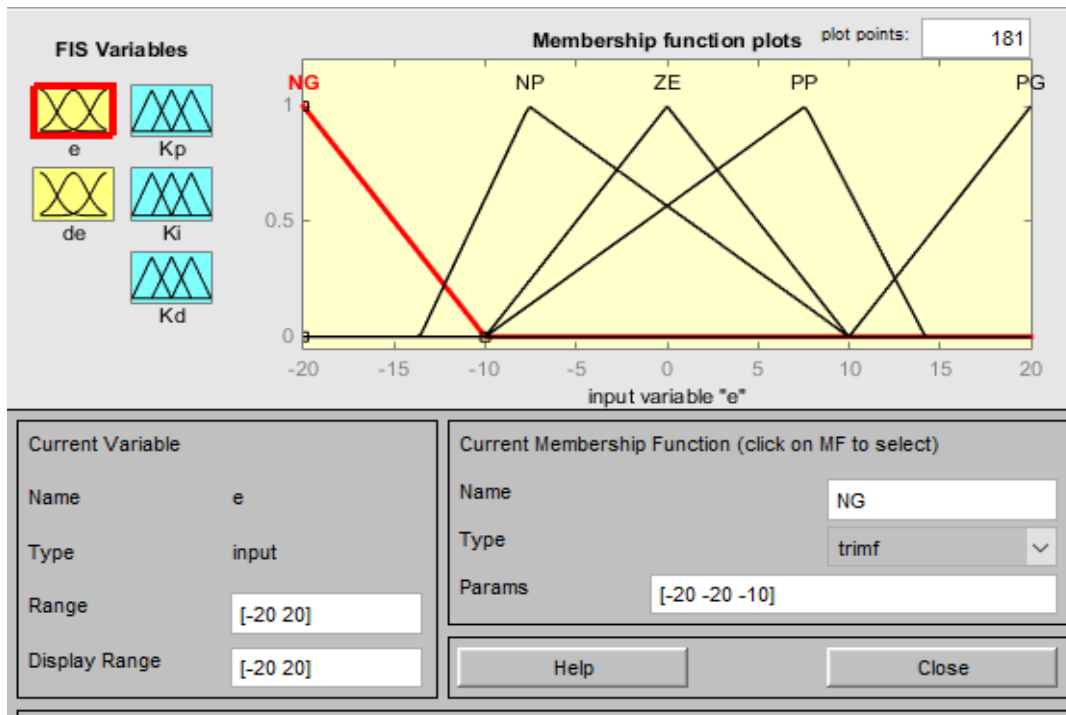


Figure IV.8.a : Fonction d'appartenance de l'erreur.

La dérivée de l'erreur (Δe) du régulateur flou a été aussi partitionnée 5 valeurs linguistiques dans un intervalle de [-20 : 20].

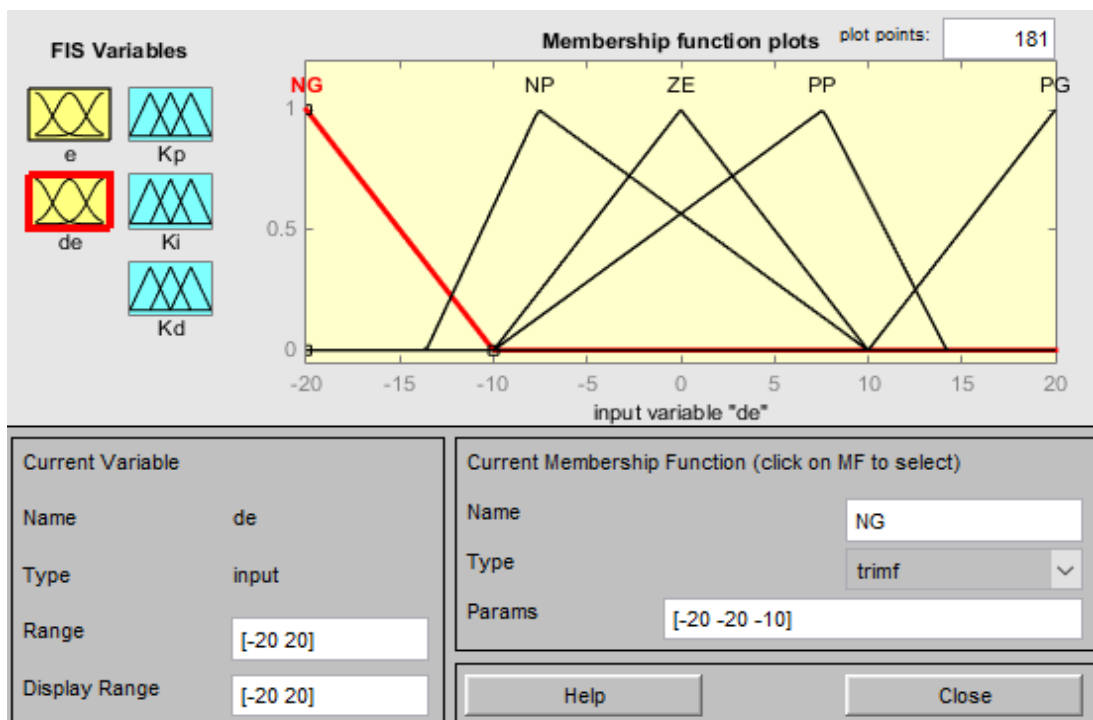


Figure IV.8.b : Fonction d'appartenance de la dérivée l'erreur.

La sortie kp du régulateur flou a été partitionnée en 7 valeurs linguistiques dans un intervalle de [0 : 30] comme illustrée la figure (IV.8.c).

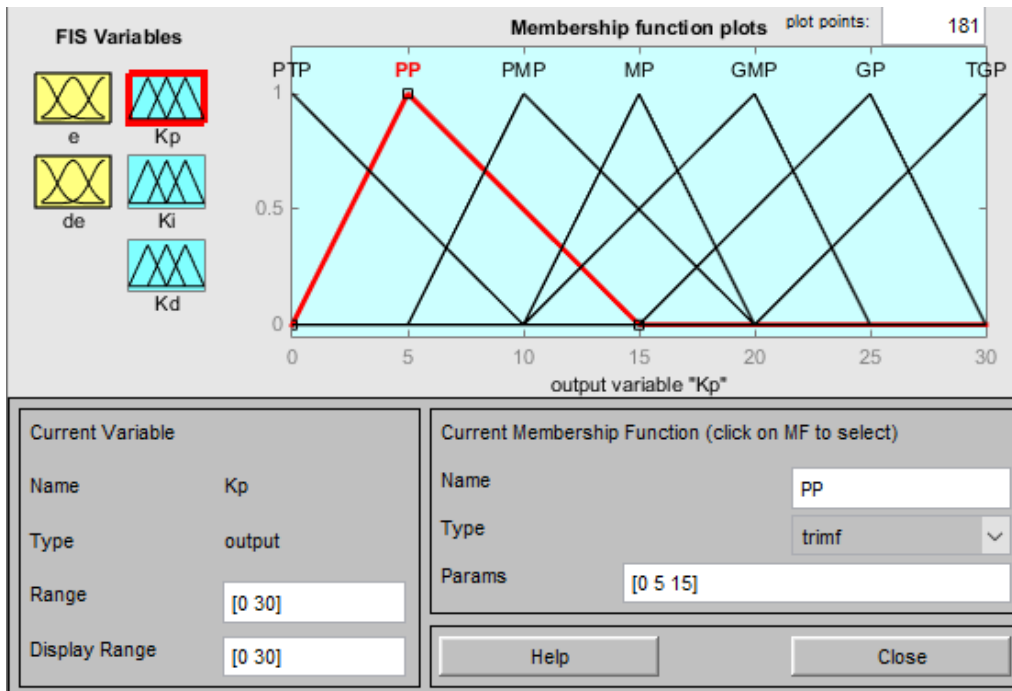


Figure IV.8.c : Fonction d'appartenance de k_p .

La sortie k_i du régulateur flou a été partitionnée en 7 valeurs linguistiques dans un intervalle de [0 : 15] comme illustrée la figure (IV.8.d).

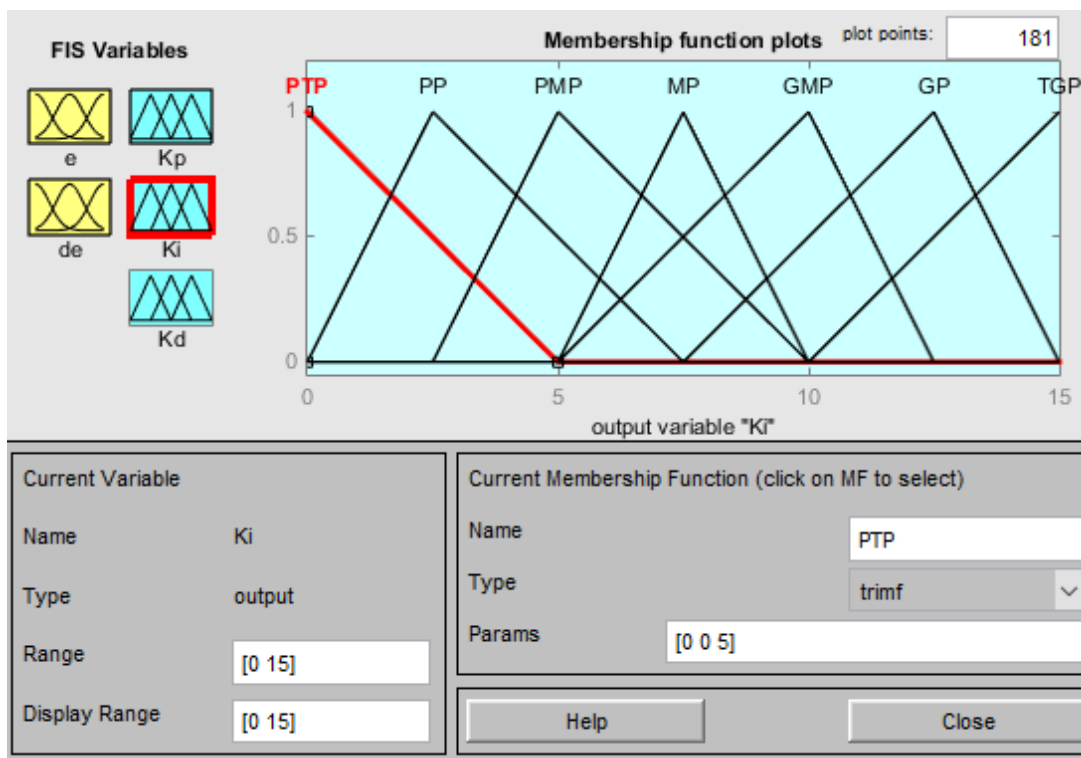


Figure IV.8.d : Fonction d'appartenance de k_i .

La sortie k_d du régulateur flou a été partitionnée en 7 valeurs linguistiques dans un intervalle de [0 : 1] comme illustrée la figure (IV.8.e).

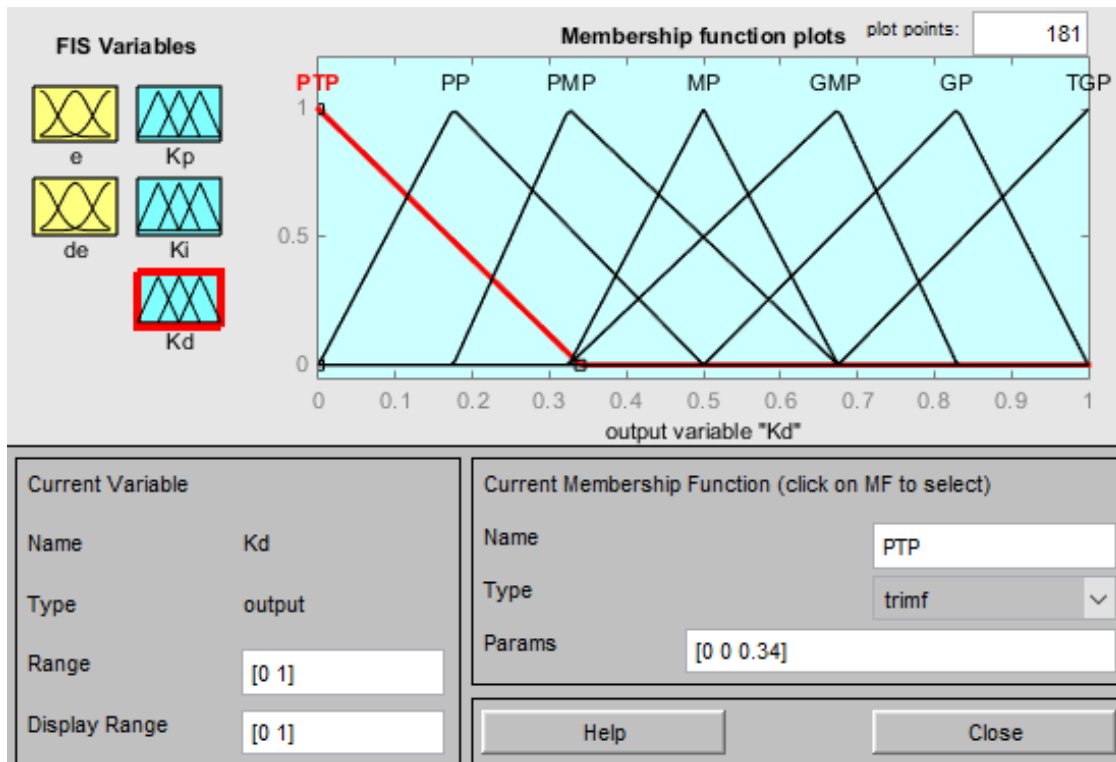


Figure IV.8.e : Fonction d'appartenance de kd.

C. Tableaux des règles floues :

Les tableaux (IV.3.a, IV.3.b et IV.3.c) représentent les règles de la logique floue que nous allons obtenir pour la conception de notre régulateur flou.

Tableau IV.3.a : Tableau des règles de la logique floue appliqué dans le contrôleur PID pour kp.

e / Δe	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	PTG	PTG	PTG	PTG	PTG
NP	PMG	PMG	PMG	PG	PTG
ZE	PTP	PTP	PP	PMP	PMP
PP	PMG	PMG	PMG	PG	PTG
PG	PTG	PTG	PTG	PTG	PTG

Tableau IV.3.b : Tableau des règles de la logique floue appliqué dans le contrôleur PID pour k_i .

e / Δe	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	PM	PM	PM	PM	PM
NP	PMP	PMP	PMP	PMP	PMP
ZE	PP	PP	PTP	PP	PP
PP	PMP	PMP	PMP	PMP	PMP
PG	PP	PP	PP	PP	PP

Tableau IV.3.c : Tableau des règles de la logique floue appliqué dans le contrôleur PID pour k_d .

e / Δe	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	PTP	PMP	PM	PG	PTG
NP	PMP	PMG	PG	PTG	PTG
ZE	PM	PG	PG	PTG	PTG
PP	PMG	PTG	PTG	PTG	PTG
PG	PTG	PTG	PTG	PTG	PTG

On utilise les sigles des variables suivants :

- NG : négative grande.
- NP : négative petite.
- ZE : zéro
- PP : positive petite.
- PG : positive grande.
- PTP : positive très petite.
- PM : positive moyenne.
- PMP : positive moyenne petite.
- PMG : positive moyenne grande.

- PG : positive grande.
- PTG : positive très grande.

La figure (IV.9) représente l'interface du tableau des règles de la logique floue sous l'environnement Matlab/Simulink.

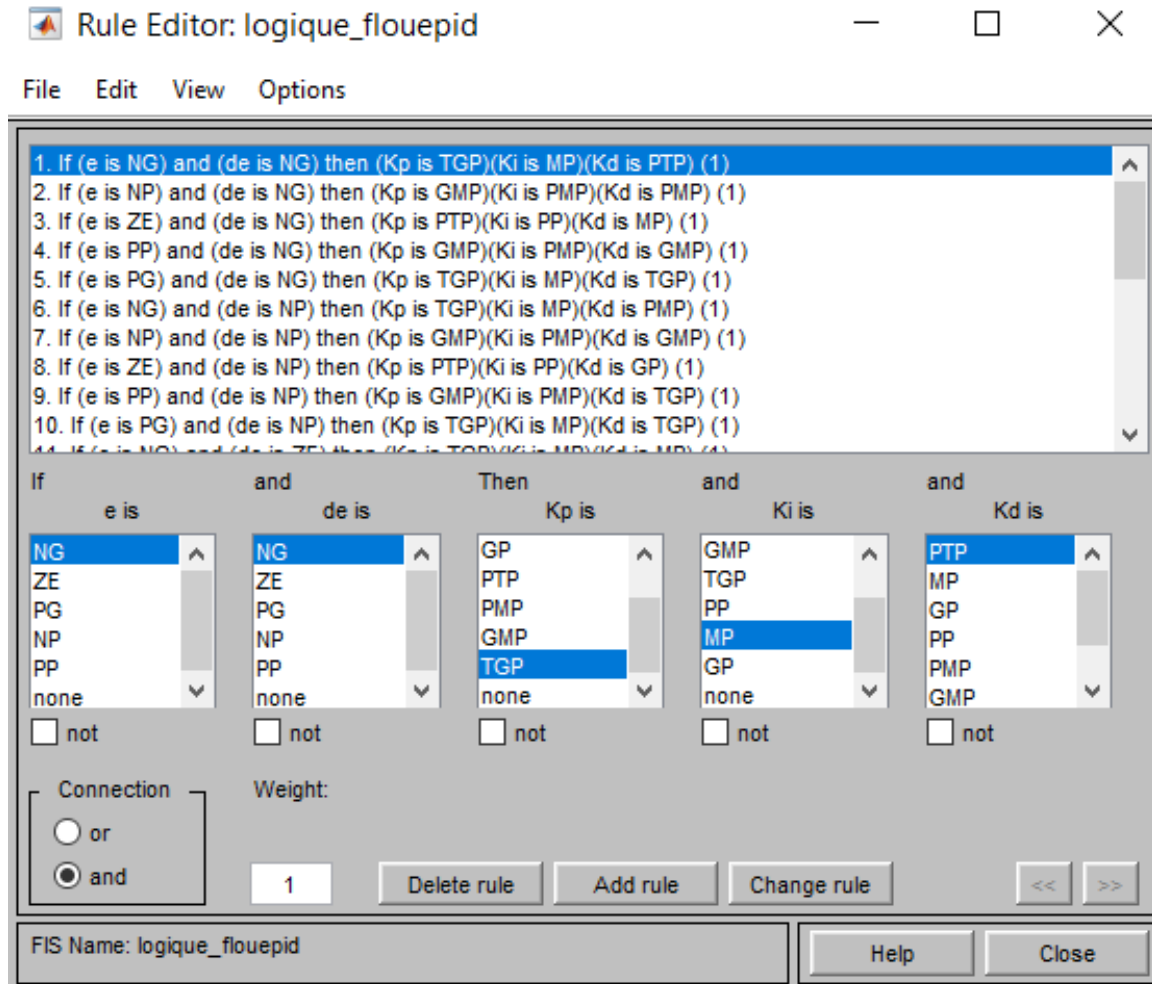


Figure IV.9 : Tableau des règles de la logique floue.

Pour visionner les règles de la logique floue pour le système d'inférence floue, nous avons illustré la figure (IV.10).

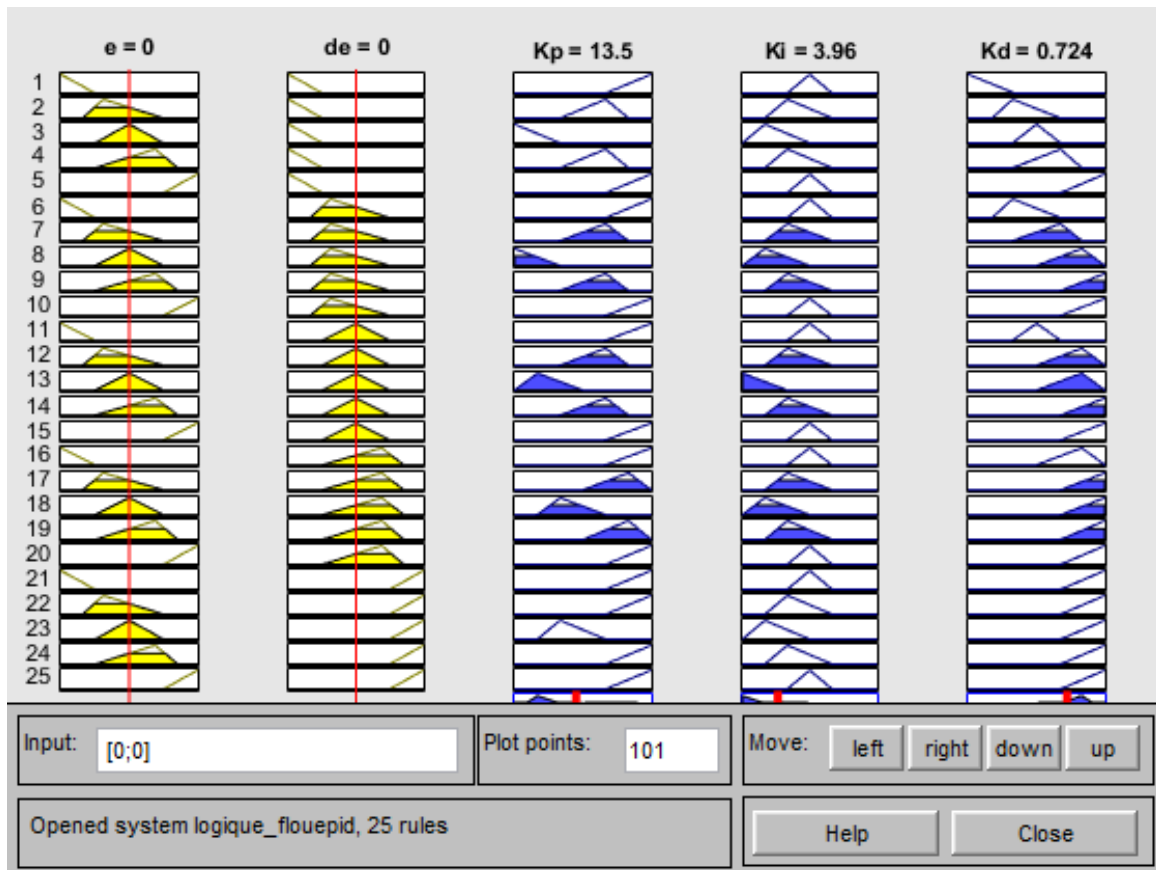


Figure IV.10 : Visionnage des règles de la logique floue.

D. Modèle du régulateur flou sous Matlab/Simulink :

La figure (IV.11) représente le modèle du régulateur flou développé dans notre travail sous Matlab/Simulink.

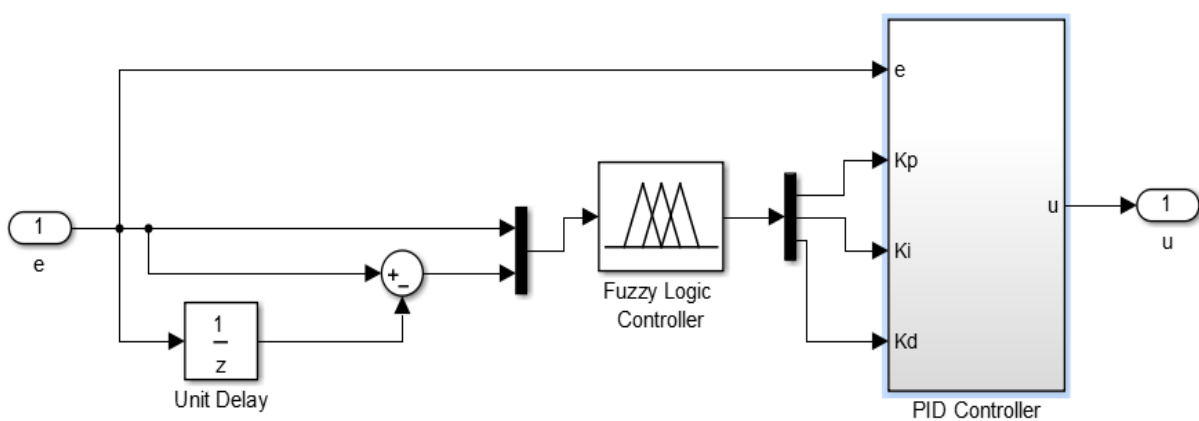


Figure IV.11 : Modèle du régulateur flou sous Matlab/Simulink.

IV.7. Montage de la boucle de la régulation de TICTS avec régulateur flou :

Après avoir conçu le régulateur flou, nous avons utilisé Matlab/Simulink pour créer le schéma bloc de la boucle de régulation du système de deux réservoirs coniques interactif. Dans ce schéma, nous avons intégré notre régulateur flou comme illustré dans la figure ci-dessous.

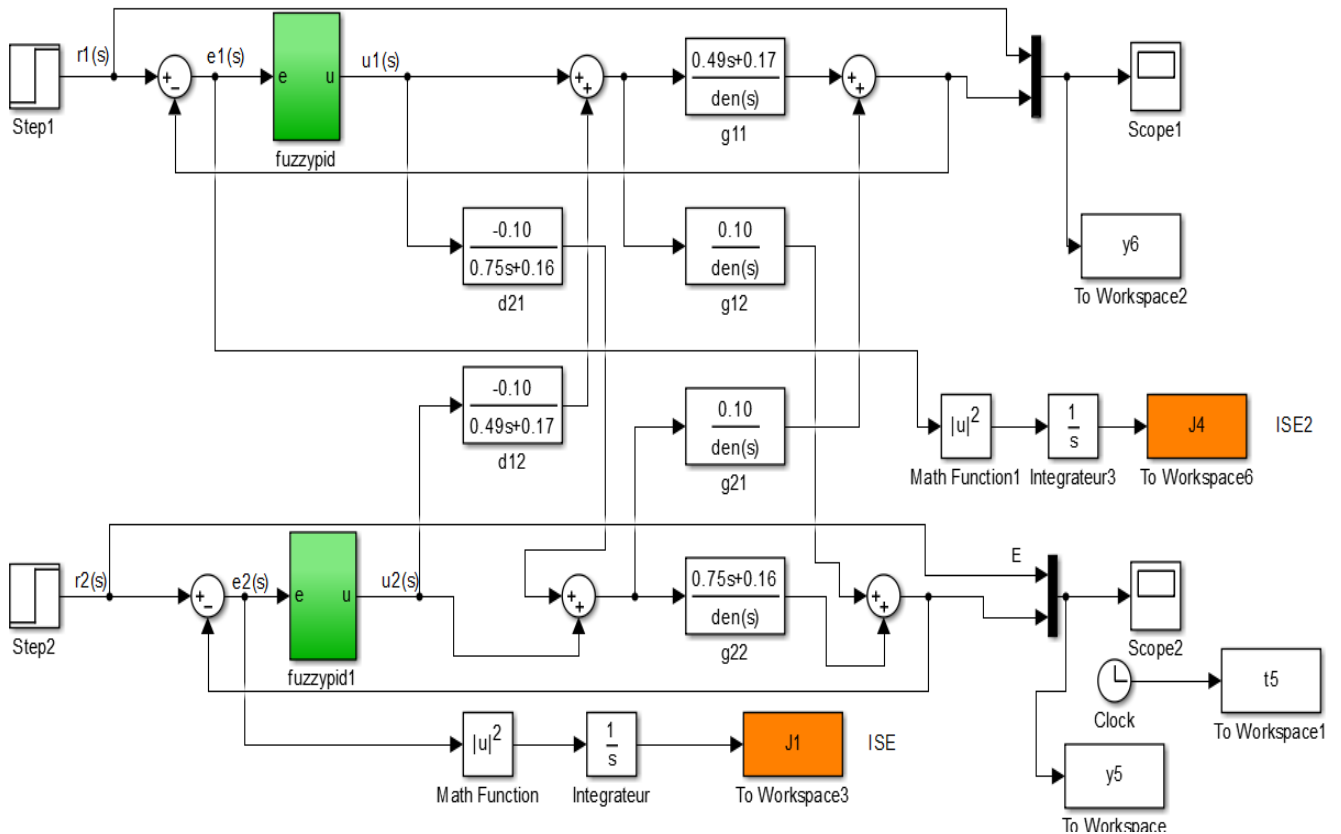


Figure IV.12 : Schéma de la boucle de la régulation de TICTS avec régulateur flou.

IV.8. Résultats de simulation :

Les figures (IV.13.a, IV.13.b, IV.13.c et IV.13.d) représentent les signaux des erreurs et de commande des sous-systèmes 1 et 2 contrôlés par le régulateur PID à base de la logique floue.

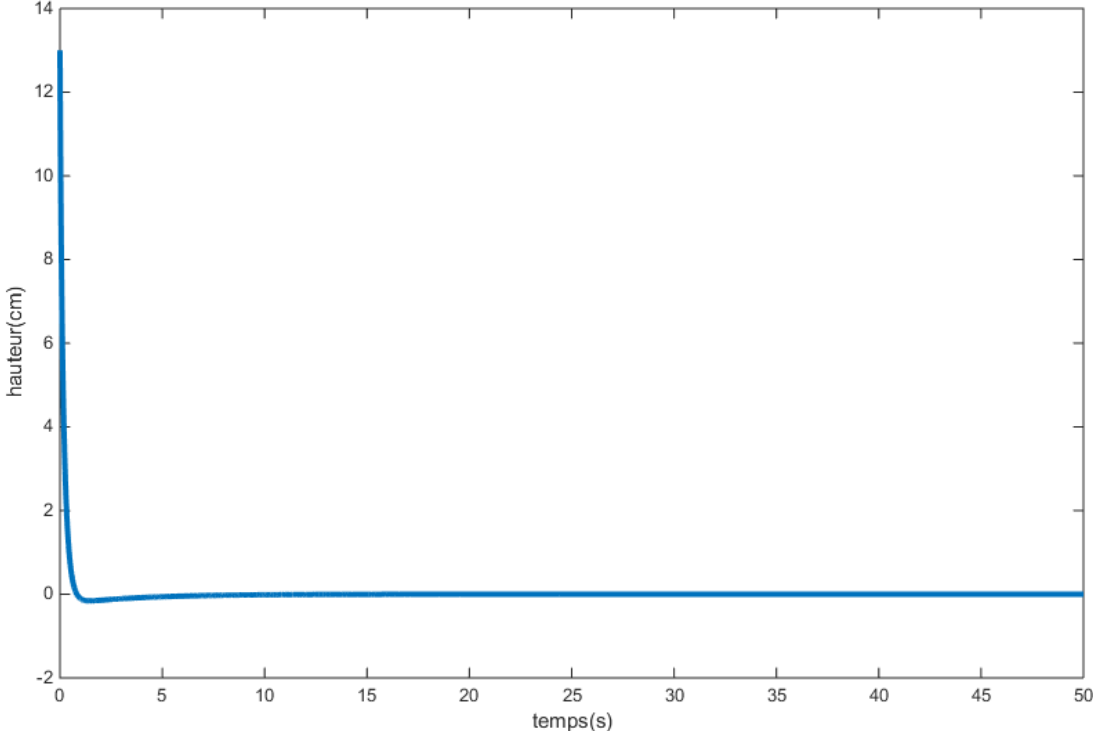


Figure IV.13.a : le signal de l'erreur du sous-système 1.

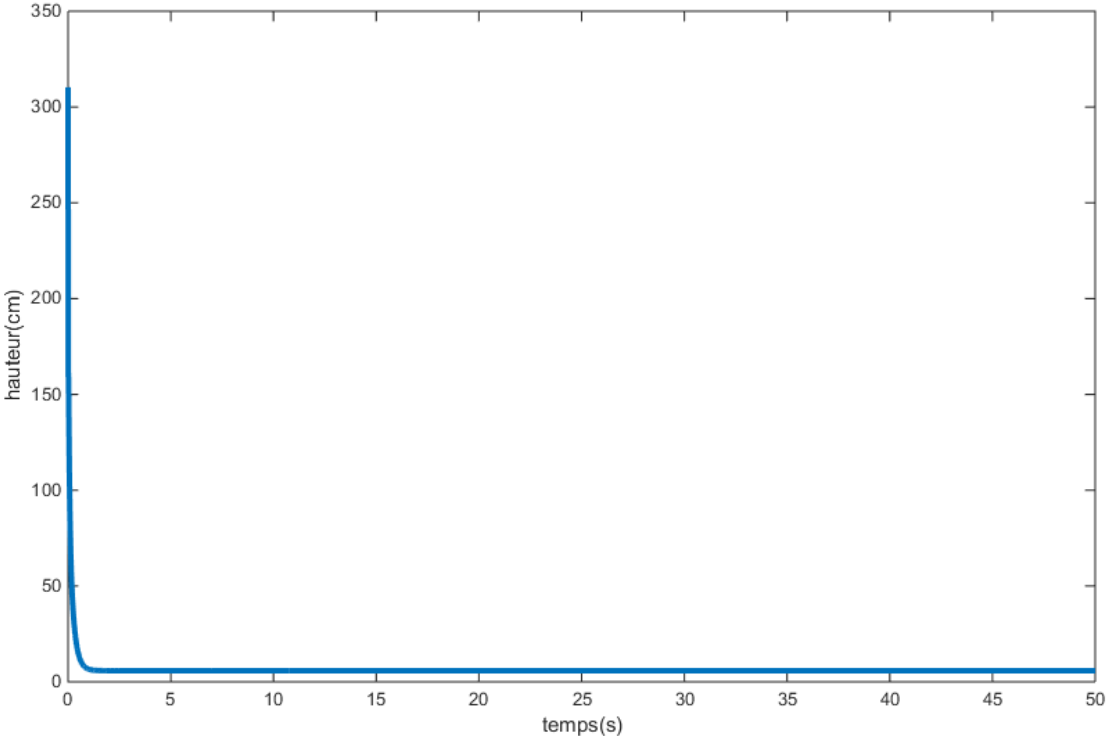


Figure IV.13.b : le signal de commande du sous-système 1.

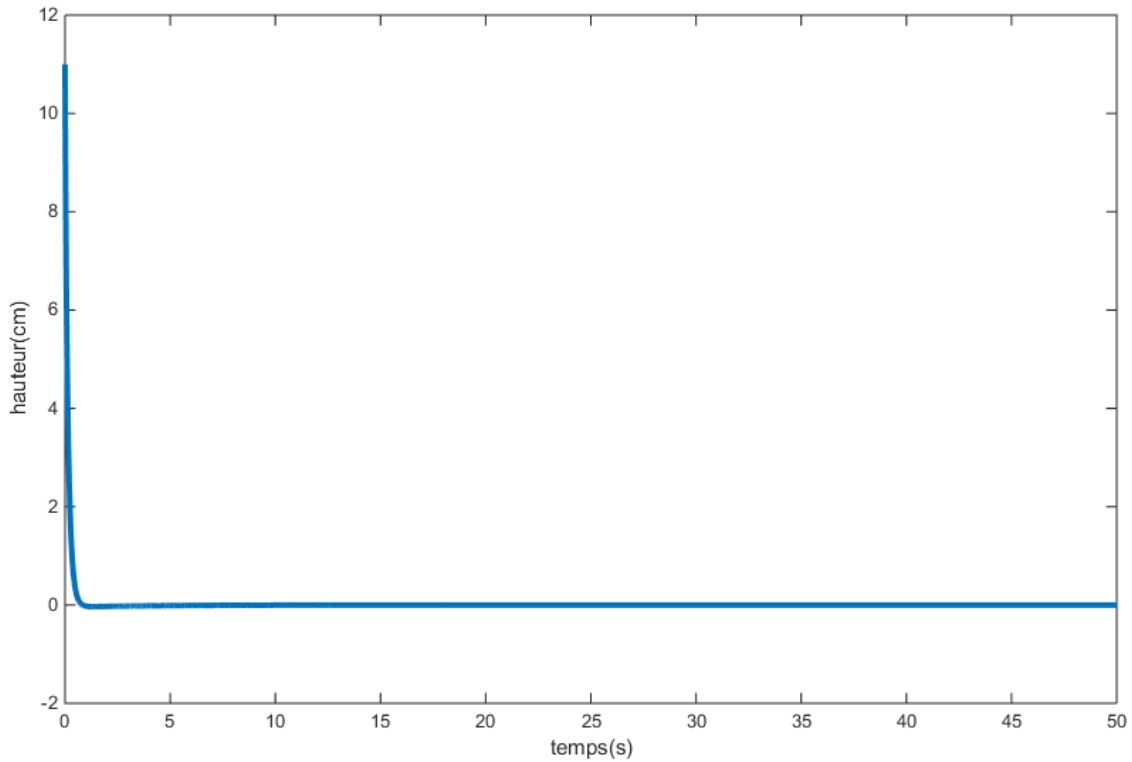


Figure IV.13.c : le signal d'erreur du sous-système 2.

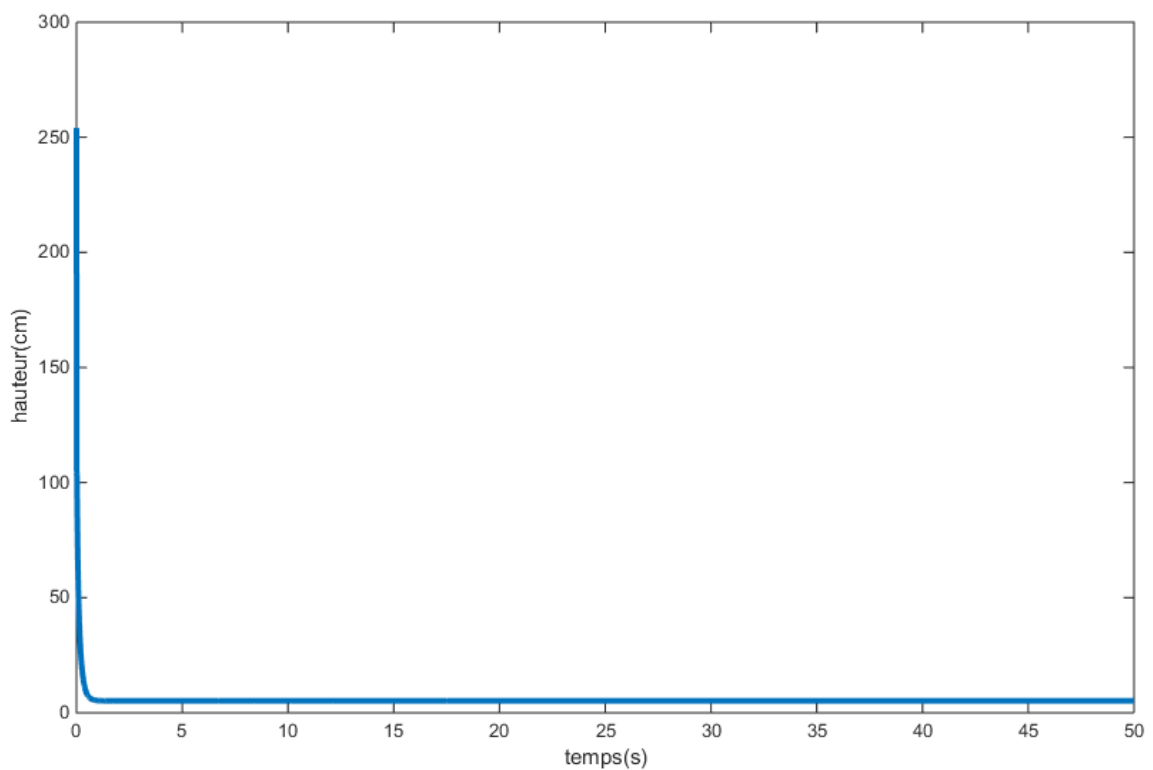


Figure IV.13.d : le signal de commande du sous-système 2.

Les figures (IV.14.a et IV.14.b) représentent les réponses indicielles du régulateur à base de la logique floue.

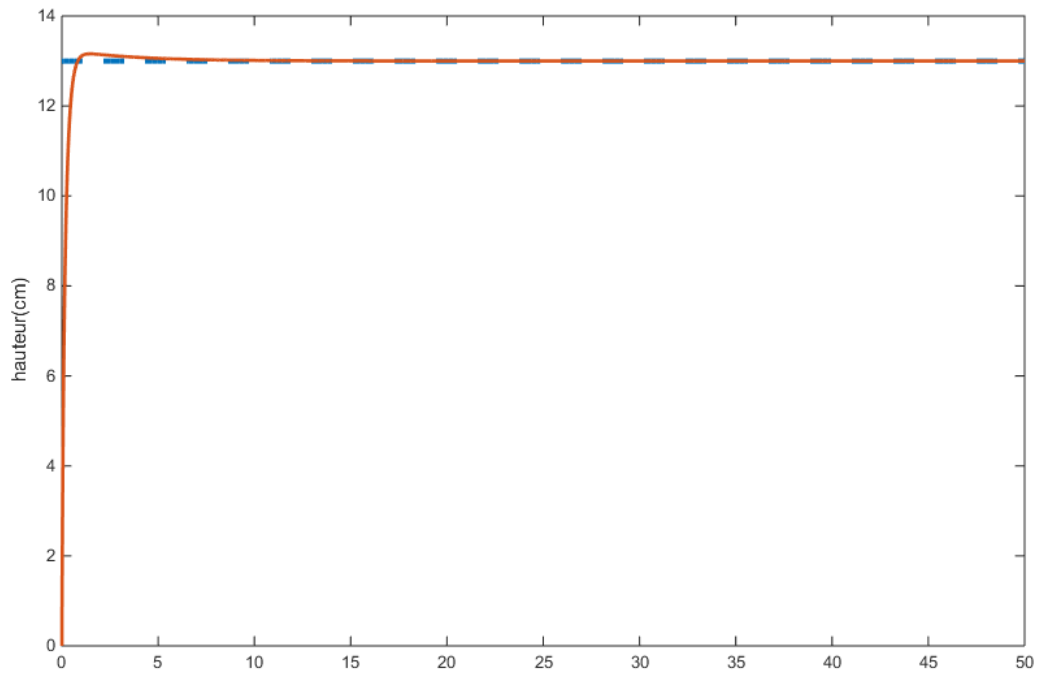


Figure IV.14.a : La réponse indicielle du sous-système 1.

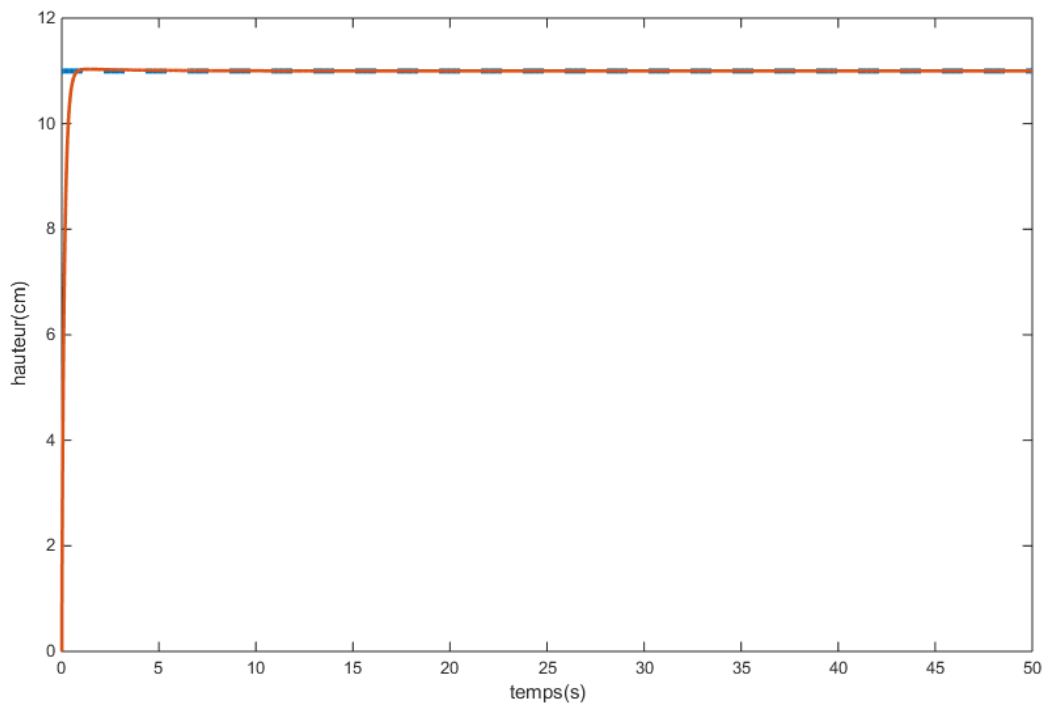


Figure IV.14.b : La réponse indicielle du sous-système 2.

Nous remarquons que notre système est stable, rapide et presque n'y a pas dépassement.

En plus les figures de l'erreur montre qu'elle tend vers zéro très rapidement.

IV.9. La comparaison entre les deux régulateurs :

A. Les réponses indicielles :

Dans cette partie, on va présenter une comparaison entre les différentes performances des régulateurs étudiés dans notre travail pour sélectionner le meilleur régulateur.

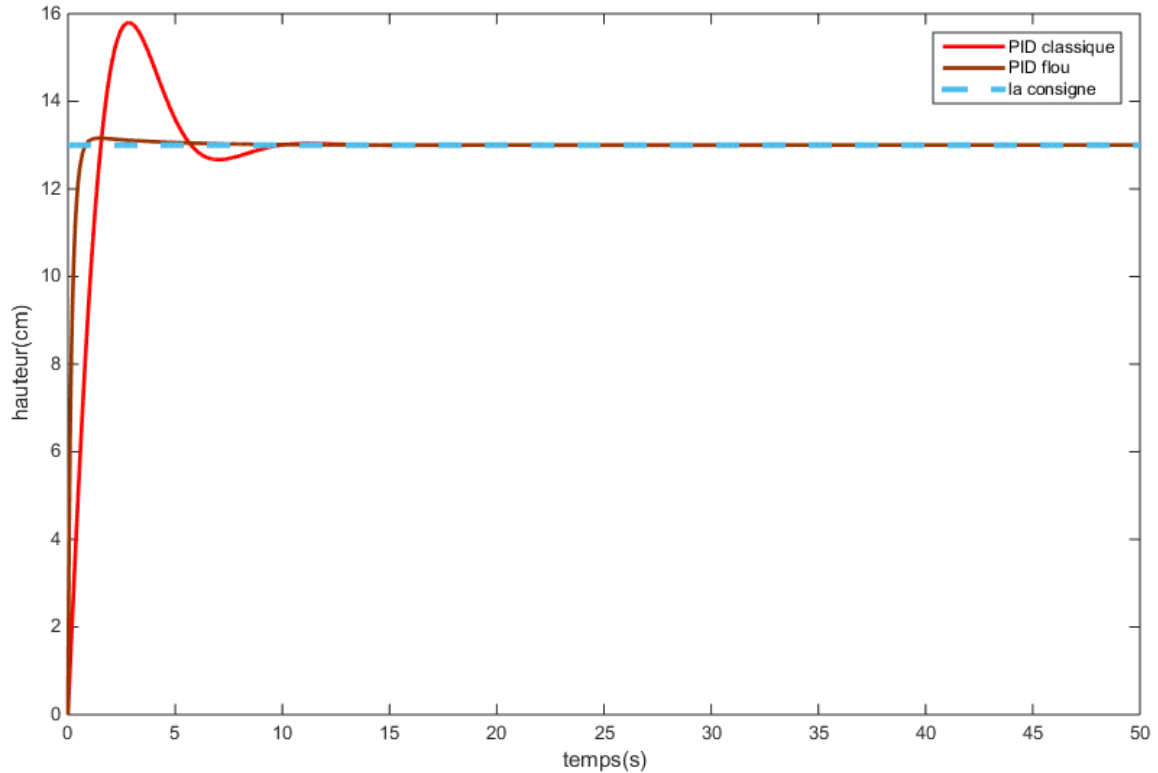


Figure IV.15.a : comparaison de la réponse indicielle du sous-système 1 entre les deux régulateurs.

Pour le contrôleur de Ziegler-Nichols la réponse indicielle du sous-système 1 montre que on a un dépassement du 21.53% et pour la réponse indicielle du sous-système 2 le dépassement presque égale 15.9%, ces deux dépassements sont grands par rapport les résultats indiciels du g11 et g22 avec le contrôleur flou qui égales par respectivement 1.15% et 0.3%.

Ce qui concernant la rapidité notre régulateur proposé est plus rapide que le régulateur classique de Ziegler-Nichols et atteint la stabilité plus rapidement.

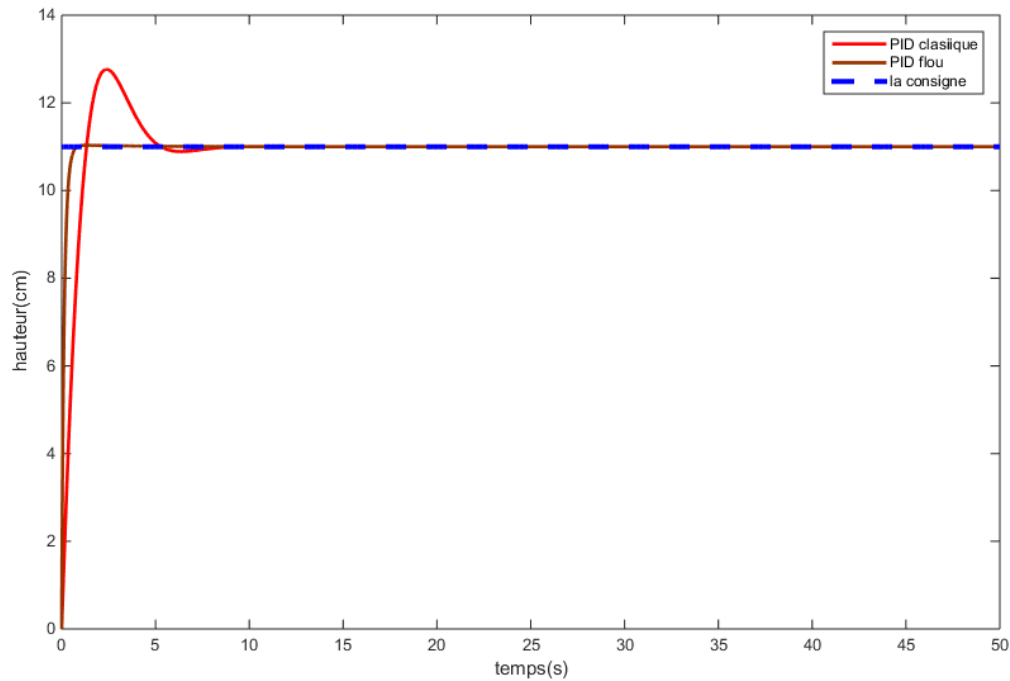


Figure IV.15.b : comparaison de la réponse indicielle du sous-système 2 entre les deux régulateurs.

B. Les erreurs :

Concernant les erreurs on va faire une comparaison entre l'erreur absolue intégrale IAE (Integral Absolute Error), l'erreur absolue pondérée dans le temps ITAE (Integral Time-weighted Absolute Error) du système contrôlé par le PID classique et l'autre contrôlé par le PID floue.

Tableau IV.4 : les erreurs IAE et ITAE contrôlé par les régulateurs.

Le contrôleur	Le système	IAE	ITAE
PID classique	G11	16.3197	32.9697
	G22	9.9620	14.7213
PID floue	G11	2.7459	3.1247
	G22	1.3186	-0.2542

On remarque que les erreurs IAE et ITAE du système contrôlé par le régulateur PID basé sur la logique floue sont inférieures de celles du système contrôlé par le régulateur PID classique de Ziegler-Nichols.

IV.10. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons appliqué la méthode de découplage simplifié sur notre système de deux réservoirs coniques interactifs, les résultats de la simulation obtenus sont très satisfaisants et le système a été découplé parfaitement (pas d'interaction entre g_{11} et g_{22}).

Concernant les régulateurs, on a développé un régulateur intelligent à base de la logique floue. Après cela, on a fait une comparaison entre notre régulateur proposé et un autre régulateur PID classique (méthode de Ziegler-Nichols) pour déterminer le meilleur régulateur. La comparaison entre les résultats des deux montre que le régulateur intelligent à base de la logique floue présente des meilleures performances par rapport à l'autre régulateur classique.

Conclusion

Générale

Conclusion générale :

Notre mémoire aborde le domaine de la commande des procédés multivariables. Pour ce faire, le premier objectif de notre travail était de faire une recherche bibliographique sur les méthodes de découplage des systèmes multivariables (MIMO). Ces méthodes jouent un rôle crucial dans l'atténuation des interactions ce qui est essentiel pour la commande multiboucle (structure de commande décentralisée). Cette commande multiboucle offre en conséquence de nombreux avantages tels que la simplicité d'implémentation et mise en œuvre, l'utilisation des techniques de commande conventionnelle éprouvées en termes d'efficacité, ainsi que la préservation de la stabilité en cas de défaillance d'une boucle (capteur ou actionneur défaillant, par exemple).

Dans le deuxième chapitre, on a fait une recherche sur la commande à logique floue classée dans les approches heuristiques. Nous avons concentré sur la technique d'inférence floue de type Mamdani ; la méthode la plus utilisée dans des nombreux domaines d'application, tels que la commande des systèmes, la prise de décision, la modélisation de connaissances, etc.

Pour appliquer le découplage et le contrôleur PID flou proposé, on a choisi pour cela le système de deux réservoirs coniques interactifs (TICTS) amplement utilisé par les chercheurs dans le domaine de l'automatique. Dans ce manuscrit, la méthode RGA développée dans le premier chapitre a été utilisée pour analyser les interactions existantes dans le système de TICTS. Dans le troisième chapitre, on a exposé brièvement le régulateur PID synthétisé par la méthode de Ziegler-Nichols et nous avons expliqué leurs deux approches pour afin de faire une comparaison entre cette méthode de Ziegler et la méthode à base de la logique floue.

Dans le quatrième chapitre, un modèle mathématique du système TICTS est obtenu afin de calculer la matrice des gains relatifs. Ensuite, on a calculé la matrice de découpleur simplifié que l'on a utilisé dans la simulation.

Dans le dernier chapitre, on a appliqué le découplage simplifié dans la simulation, les résultats obtenus étaient satisfaisants où constate que les interactions ont été affaibli puisque la première entrée n'affecte pas la deuxième sortie et vice versa. Aussi, dans ce chapitre on a donné le schéma de régulateur PID classique dimensionné par la méthode de Ziegler-Nichols ainsi que les étapes effectuées pour concevoir un régulateur PID flou de type ajustement flou des gains (FGS : Fuzzy Gain Scheduling) sous le logiciel Matlab/Simulink. Par ailleurs, nous avons fait, une comparaison en termes de rapidité entre le régulateur PID flou proposé et le régulateur PID classique. Nous avons donc constaté que les résultats de simulation obtenus par

Conclusion Générale

le régulateur flou proposé étaient beaucoup plus mieux que celles obtenues par le régulateur PID classique.

Pour conclure, l'objectif que nous avons fixé dans de ce mémoire a été atteint à savoir : 1) minimiser les interactions dans un système MIMO par un découpleur afin de pouvoir une adopter l'architecture décentralisé de commande (commande multiboucle)

2) proposer un contrôleur PID flou de type ajustement flou des gains (FGS : Fuzzy Gain Scheduling) pour chaque boucle.

3) comparer les résultats de simulation entre le PID flou proposé et le PID classique.

Bibliographie

- [1] **W. K. Ho**, C. C. Hang, W. Wojsznis, and Q. H. Tao, « Frequency domain approach to self-tuning PID control, » *Contr. Eng. Practice*, vol. 4, no.6, pp. 807–813, (1996).
- [2] **M. Zhuang** and D. P. Atherton, « Automatic tuning of optimum PID controllers, » *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 140, pt. D, no. 3, pp. 216–224, (May 1993).
- [3] **Johnson, M. A.**, & Moradi, M. H. « PID control». London, UK: Springer-Verlag London Limited, (2005).
- [4] **Tassadit BENABDALLAH**. « Les Techniques de Découplage Explicite et Implicite des Systèmes Multivariables. Application sur un modèle d'une colonne de distillation binaire », thèse de magister, Université de Boumerdès, (2011).
- [5] **P. B-Desphande**, « Multivariable Process Control », Instrument Society of America, Book design and production by Word Crafters. Editorial Services, Inc. (1989).
- [6] **A. MAIDI**. « Analyse des Interactions dans les Systèmes à Grande Échelle : application à la commande multiboucle des systèmes fortement couplés », thèse de magister, Université de Boumerdès, (2001).
- [7] **Dan Chen** and Dale E. Seborg Dept. of Chemical Engineering, University of California, Santa Barbara, CA 93106.
- [8] **LAIFA Sami**. « Contribution à la synthèse des lois de commande à retour fractionnaire pour les systèmes multivariables », thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma, (2023).
- [9] **Thomas E. Marlin**. « Designing Process and Control Systems for Dynamic Performance» 2nd edition.
- [10] **André Pomerleau**. « Commande Multivariable », notes de cours, Université de Laval.
- [11] **Lu Liu**, Siyuan Tian, Dingyu Xue, Tao Zhang, Yang Quan Chen, and Shuo Zhang. « A review of industrial MIMO decoupling control ». *International Journal of Control, Automation and Systems* 17(X). (2019).
- [12] **F.G. Shinskey**. « Process Control System », 4th edition.
- [13] **Harold. L. Wide**. « Inverted Decoupling: A Neglected Technique » Wade Associates, Inc., I0700 Richmond. Suite 205, Houston. TX 77042, USA.

Bibliographie

- [14] **William. L. Luyben.** « Distillation Decoupling ». AICHE journal / Volume 16, Issue 2/ p.198-203, (March 1970).
- [15] **V. Pavan. Kumar.** « A Comparative Study On Decoupling Methods For Time-Delay Systems ». Department of Electrical Engineering National Institute of Technology Rourkela.
- [16] **L. Gacogne,** « Logique Floue et Applications », Institut d'Informatique d'Entreprise d'Evry, Conservatoire National des Arts et Métiers, Ministère de l'Education Nationale Française, France, (Novembre 2003).
- [17] **V. Lacroze.** « Réduction de la Complexité des Contrôleurs Flous : Application à la Commande Multivariable ». Thèse de Doctorat en Automatique et Informatique Industrielle, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France, (1997).
- [18] **Zadeh, L. A.** « Fuzzy sets. Information and Control », 8(3), 338-353, (1965).
- [19] **Leekwijck, W. V.** and Kerre, E. E. « Defuzzification criteria and classification. Fuzzy Sets and Systems », 108(2) :159 – 178. [Cited at p. 9], (1999).
- [20] **F. Chevré** et F. Guély. « La Logique Floue », Cahier Technique N° 191, Groupe Schneider, CT Edition, (Mars 1998).
- [21] **J. Godjevac.** « Idées Nettes sur la Logique Floue », Collection Informatique, Première Edition, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, (1999).
- [22] **Paul R. Halmos.** « Naïve Set Theory », (1960).
- [23] **George J. Klir** et Bo Yuan « Fuzzy Sets and Fuzzy Logic : Theory and Applications » (1995).
- [24] **F. Martin McNeill** et Ellen Thro. « Fuzzy Logic: A Practical Approach » (1994).
- [25] **Iancu. I.** « A Mamdani type fuzzy logic controller. Fuzzy logic-controls, concepts, theories and applications », (2012).
- [26] **C. Gomathy. S. Shanmugavel.** «An efficient fuzzy based priority scheduler for mobile ad hoc networks and performance analysis for various mobility models ». In Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference, IEEE, Tamil Nadu.
- [27] **Mamdani, E.H.** «Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant ». Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, (1977).

Bibliographie

- [28] **Passino, K. M.** Yurkovich, S. « Fuzzy Control ». Menlo Park, CA. Addison-WesleyLongman, (1998).
- [29] **Åström. K. J.** Hägglund, T. « The future of PID control ». Control Engineering Practice (9), 1163-1175, (2000).
- [30] **MacVicar-Whelan, P.J.** « Fuzzy sets for man machine interaction ». Int. J. Man-Machine Studies (8),687-697, (1976).
- [31] **Tang, K. L.** Mulholland, R. J. « Comparing fuzzy logic with classical controller designs». IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics 17(6): 1085-108, (1987).
- [32] **Zhao, Z. Y.** Tomizuka, M. Isaka.S. « Fuzzy gain scheduling of PID controllers». IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics 23(5), 1392-1398, (1993).
- [33] **Ling, C.** Edgar, T.F. « Real-time control of a water-gas shift reactor by a model-based fuzzy gain scheduling technique». J. Proc. Cont. 7(4), 239-253, (1997).
- [34] **Takagi, T. Sugeno. M.** « Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control». IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 15(1), 116, (1985).
- [35] **Timothy J. Ross.** « Fuzzy Logic with Engineering Applications ».
- [36] **S. Bennett.** « A History of Control Engineering 1930-1955», IEE Control Engineering Series 47, (1993).
- [37] **S. Bennett.** « Nicholas Minorsky and the Automatic Steering of Ships ». IEEE Control Systems Magazine, vol. 4, no .4, pp.10–15, (1984).
- [38] **Copeland. B. R.** « The design of PID controllers using Ziegler Nichols tuning. Ziegler-Nichols Method », (2008).
- [39] **Bansal, H. O.** Sharma. R. & Shreeraman. R. « PID controller tuning techniques : a review ». Control Eng. Technol, 2(4), 168-176. (2012).
- [40] **Chmielewski, T. A., & Korbicz, J. K.** « Modeling and control of hybrid systems: a polynomial approach. Springer Science & Business Media », (2011).
- [41] **V. R. Ravi. T. Thyagarajan** « Adaptive Decentralized PI Controller for Two Conical Tank Interacting Level System ». Arab J Sci Eng, (2014).

Bibliographie

[42] **S.K. Lakshmanprabu** « Linear Quadratic Gaussian Control for Two Interacting Conical Tank Process ». International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), (2014).