

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Automatique

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme

D'Ingénieur d'Etat en Automatique

Thème

Commande par modèle interne d'un
système hydraulique DTS 200

Proposé par : M^r KOUADRI

Présenté par :

Dirigé par : M^r MAIDI

KRIM Omar

KHOUAS Sadek

Soutenu le : 07 /07 /2010

Promotion 2010

Remerciements

Nous tenons à remercier en premier lieu, notre promoteur M^r MAIDI et notre Co-promoteur M^r KOUADRI pour leurs conseils et de nous avoir suivi tout au long de l'élaboration de ce travail.

Nous remercions les membres de jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail, et d'apporter leurs éclaircissements. Sans oublier de remercier aussi tous les enseignants ayant contribué à notre formation de près ou de loin.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- Mes parents qui m'ont toujours aidé et encouragé.
- Mon frère Mohamed.
- Ma petite soeur Samia.
- Ma soeur Doreen et son mari Lars.
- Tous mes proches.

Sans oublier mes chers amis, ainsi celui avec qui j'ai l'immense plaisir de partager ce travail, mon camarade.

Omar KRIM

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- Mes parents qui m'ont toujours aidé et encouragé.
- Mes frères Hassan et Said.
- Ma petite soeur Kahina.
- Tous mes proches.

Sans oublier mes chers amis, ainsi celui avec qui j'ai l'immense plaisir de partager ce travail, mon camarade.

Sadek KHOUAS.



Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------	---

Chapitre I : Systèmes multivariables

I.1 Introduction	3
I.2 Systèmes multivariables	3
I.2.1 Définition	3
I.2.2 Représentation d'un procédé multivariable par matrice fonction de transfert	4
I.2.3 Cas d'une boucle ouverte	5
I.2.4 Matrice fonction de transfert d'un procédé multivariable en boucle fermée	6
I.2.5 Représentation par modèle d'état	8
I.2.6 Passage de la représentation d'état à la matrice fonction de transfert	9
I.3 Conclusion	11

Chapitre II : Commande par modèle interne

II.1 Introduction	12
II.2 Passage de la régulation classique à la régulation par modèle interne	13
II.3 Structure de la commande par modèle interne	16
II.4 Le signal du retour	17
II.5 Commande monovariable par modèle interne	18
II.5.1 Définition et représentation d'un système monovariable	18
II.5.1.1 Définition	18
II.5.1.2 Représentation	18
II.5.2 Synthèse du correcteur par modèle interne	19
II.5.2.1 Expression de $y(s)$	19
II.5.2.2 Rejet de perturbation	20

II.5.2.3 Méthode de Frank	22
II.6 Commande multivariable par modèle interne	24
II.6.1 Synthèse d'un procédé de commande par modèle interne	24
II.6.2 Analyse des interactions et la commande IMC.....	26
II.6.3 Choix de la meilleure configuration de commande pour un procédé 2×2	26
II.6.4 Conception d'un correcteur MIMO dans un environnement multiboucle	28
II.7 Conclusion	31

Chapitre III : application de la commande IMC pour la commande d'un système hydraulique

III.1 Introduction	32
III.2 Description de la station (3 tank system DTS-200)	32
III.2.1 Données technique du système.....	34
III.2.2 les états des vannes au cours de l'expérience.....	35
III.2.3 Description mathématique du système	35
III.3 Commande par modèle interne	36
III.3.1 Linéarisation autour d'un point de fonctionnement	36
III.3.1.1 Point de fonctionnement	36
III.3.1.2 Linéarisation	37
III.3.1.3 Le modèle linéaire	38
III.3.1.4 La matrice fonction de transfert.....	39
III.3.2 Modèle approché	40
III.3.3 Le correcteur IMC	42
III.3.4 système non linéaire	44
III.3.5 Schéma de simulation global.....	45
III.4 Changement de consignes	45
III.5 rejet de perturbation	49
III.5.1 Fermeture de la vanne V_1 à 50%	49

III.5.2 Ouverture de la vanne V_4 a 50%	50
III.5.3 Ouverture de la vanne V_6 a 20%	51
III.6 Conclusion	53
Conclusion générale	54



Liste des symboles

m : nombre de commandes.

r : nombre de sorties.

$G(s)$: matrice fonction de transfert du procédé.

$G_{ij}(s)$: fonction de transfert de la i^{eme} ligne et la j^{eme} colonne de $G(s)$.

$G_{ii}(s)$: fonction de transfert de la i^{eme} ligne et la i^{eme} colonne de $G(s)$.

$G_c(s)$: matrice fonction de transfert du correcteur.

$Z(s)$: matrice fonction de transfert des perturbations.

$A(t)$: matrice d'état dynamique (d'évolution).

$B(t)$: matrice de commande ou d'entrée.

$C(t)$: est la matrice de mesure ou de sortie.

$D(t)$: est la matrice de transition directe.

$x(t)$: est le vecteur d'état de dimension.

$u(t)$: est le vecteur de commande.

$y(t)$: est le vecteur de sortie.

I_n : Matrice identité.

$G_{bf}(s)$: fonction de transfert en boucle fermée.

$G(s)$: fonction de transfert du procédé.

$r(s)$: signal d'entrée (consigne).

$p(s)$: perturbation en sortie du processus.

$C(s)$: fonction de transfert du correcteur.

$M(s)$: fonction de transfert du modèle.

$d(s)$: écart sortie du procédé et sortie du modèle.

$H(s)$: La fonction de transfert en boucle ouverte.

$M(s)$: la partie de $M(s)$ inversible.

$M^+(s)$: la partie de $M(s)$ non inversible.

$F(s)$: filtre passe-bas.

f : la constante de temps du filtre.

n : ordre du filtre.

y_m : sortie du modèle.

y : sortie du procédé.

$e(s)$: écart entrée-sortie.

$C(s)$: matrice fonction de transfert du correcteur.

$M(s)$: matrice fonction de transfert du modèle.

$M^-(s)$: la partie de $M(s)$ inversible.

$M^+(s)$: la partie de $M(s)$ non inversible.

PID : régulateur proportionnel intégrateur dérivateur.

s : operateur de Laplace.

IMC : commande par modèle interne.

$\| \cdot \|$: norme de convergence moyenne.

A : section des réservoirs T1, T2 et T3.

C_{13} : paramètre de l'écoulement entre les réservoirs T1 et T3.

C_{32} : paramètre de l'écoulement entre les réservoirs T2 et T3.

C_{20} : paramètre de l'écoulement entre le réservoir T2 et le réservoir principal.

h_{max} : la hauteur maximale des réservoirs.

μ_{ij} : le coefficient de perte de charge.

S_p : section du tuyau de raccordement.

g : gravite terrestre (en Algérie $g = 9.81$).

h_1 : le niveau d'eau dans le réservoir T1.

h_2 : le niveau d'eau dans le réservoir T2.

h_3 : le niveau d'eau dans le réservoir T3.

Q_1 : le débit de la pompe P1.

Q_2 : le débit de la pompe P2.

Le travail que nous allons présenter dans ce mémoire porte sur la commande par modèle interne des procédés multivariables, l'objectif est de montrer l'apport de la IMC introduisant une consigne virtuelle calculé à partir de la différence du retour et de la consigne, l'étude sera menée en considérant comme procédé physique un système hydraulique à trois réservoirs (DTS-200).

Après un rappel de quelques notions de la théorie des procédés multivariables et des généralités sur la commande par modèle interne, dans le cas monovariable et dans le cas multivariable, nous avons présenté le système hydraulique à trois réservoirs, pour le quel on appliqué la commande IMC.

Le travail que nous allons présenter est la commande par modèle interne d'un procédé multivariable, une technique qui assure la stabilité et la robustesse en utilisant un filtre en série avec le correcteur.

Mots clés:

La commande par modèle interne, systèmes monovariables, systèmes multivariables, système hydraulique, correcteur IMC, three tank system DTS-200, analyse des interactions, linéarisation, filtre passe bas, système non linéaire.



Introduction

Lorsque le correcteur classique PID ne permet pas d'obtenir les performances désirées et qu'on ne dispose pas d'une puissance de calcul importante pour implémenter une régulation prédictive standard, le correcteur à modèle interne ou IMC (**I**nternal **M**odel **C**ontrol) s'avère être une approche intéressante. En effet ce type de correcteur est robuste, facile à régler en ligne et facile à maintenir, c'est-à-dire à faire évoluer avec le procédé, car il contient un modèle explicite du procédé. De plus, plusieurs méthodologies de synthèse de ce correcteur ont été développées, ce qui rend sa conception simple. L'intérêt de l'approche IMC est de montrer comment on peut réaliser un compromis performances-robustesse en fonction de l'incertitude des paramètres du modèle.

Pour des systèmes complexes, pour lesquels un correcteur PID équivalent n'existe pas, la synthèse IMC fournit un correcteur simple, offrant de bonnes performances, et pour lequel, la aussi, le compromis performances-robustesse peut être facilement choisi. On peut même imaginer de l'ajuster en ligne grâce à des paramètres de conception.

Dans la commande par modèle interne dans laquelle la notion de feedback n'intervient que pour corriger l'écart observé sur le procédé réel et celui prédit par le modèle, modèle servant lui-même au calcul de la commande. De façon plus intuitive, cette méthode consiste à soustraire du signal d'écart sa composante prédictible grâce au modèle, pour que ne subsiste dans le signal feedback que la part due aux perturbations et aux erreurs du modèle. Cette approche est particulièrement utile pour les procédés présentant un retard pur important ou un déphasage minimal.

L'objectif de notre travail est d'étudier une technique de commande de procédés multivariables, qui est la commande par modèle interne. Rappelons que la conception d'un système de commande par modèle interne passe nécessairement par l'analyse des interactions, existantes entre variables de commande et celles à commander, pour choisir la meilleure configuration de commande, c'est-à-dire une configuration caractérisée par un niveau d'interactions faible. Notons que le procédé physique choisi pour notre étude est un système hydraulique à trois réservoirs (three tank system DTS 200).

Ainsi, notre travail est structuré en trois chapitres organisés comme suite :

Dans le premier chapitre, nous donnons quelques généralités sur les procédés multivariables, qui seront utilisés le long de ce travail.

Dans le deuxième chapitre, nous donnons les principes théoriques et fondamentaux de la commande par modèle interne dans les cas monovariable et multivariable.

Dans le troisième chapitre, nous présentons une étude de la commande par modèle interne appliqué sur un système hydraulique à trois réservoirs (Three tank system DTS 200), et les différentes étapes de synthèse du correcteur. L'étude est effectuée en procédant à des testes de simulation se résumant dans les changements de consignes et de rejet de perturbation.

Le travail réalisé se termine par une conclusion générale sur l'étude menée dans laquelle nous donnons des perspectives de continuité.



Chapitre I

I.1 Introduction

Les procédés industriels au niveau des variables stratégiques sont très fréquemment multivariables. En effet, la quasi-totalité des systèmes industriels comprennent au moins deux variables de sorties : le débit de la matière ainsi que sa qualité.

La commande de ces procédés constitue un objectif fondamental dans le domaine de l'automatique, et demande une démarche rigoureuse pour aboutir aux résultats et réduire les phénomènes d'interaction existant entre les variables du système. Plusieurs techniques de commande ont été développées dans cette direction.

Ce chapitre sera donc consacré à des généralités sur les systèmes multivariables.

I.2 Systèmes multivariables

I.2.1 Définition

On définit un système multivariables comme un procédé qui comporte plusieurs entrées $u = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ et/ou plusieurs sorties $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$; ou une variable manipulée agit sur plus d'une sortie ou inversement, une sortie est affectée par plus d'une entrée.

La figure **I.1** représente un procédé multivariable.

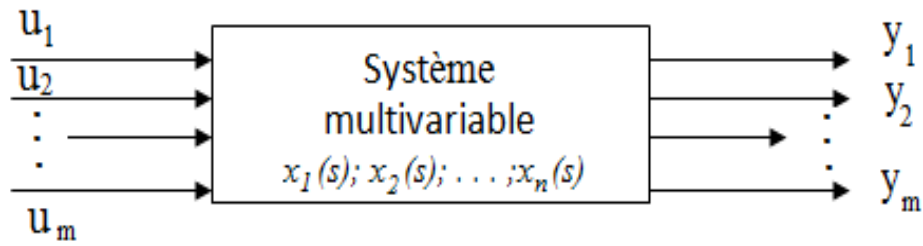


Figure I.1 : procédé multivariable.

Avec :

$u^T(s) = [u_1(s), u_2(s), \dots, u_m(s)]$: Vecteur de commande.

$y^T(s) = [y_1(s), y_2(s), \dots, y_r(s)]$: Vecteur de sortie.

$x^T(s) = [x_1(s), x_2(s), \dots, x_n(s)]$: Vecteur d'état.

Où :

- les grandeurs de commande permettent d'agir sur l'évolution du procédé.
- les variables d'état caractérisent l'état de fonctionnement du procédé.

I.2.2 Représentation d'un procédé multivariable par matrice fonction de transfert

Un procédé multivariable comporte m commandes et r sorties. En général, le nombre de commande doit être supérieur ou égal au nombre de sorties pour que le procédé soit commandable, c'est-à-dire $m \geq r$.

Pour la représentation d'un procédé multivariable par matrice fonction de transfert.

Deux cas sont envisagés :

I. 2.3 Cas d'une boucle ouverte

Si on prend le cas simple du temps continu, les r sorties y_i sont liées aux m commande u_j et aux q perturbations p_j par un ensemble de r équations suivantes :

$$\begin{aligned} y_1(s) &= G_{11}(s) u_1(s) + \dots + G_{1m}(s) u_m(s) + Z_{11}(s) p_1(s) + \dots + Z_{1q}(s) p_q(s) \\ y_r(s) &= G_{r1}(s) u_1(s) + \dots + G_{rm}(s) u_m(s) + Z_{r1}(s) p_1(s) + \dots + Z_{rq}(s) p_q(s). \end{aligned} \quad (\text{I.1})$$

Qui s'écrit sous la forme matricielle

$$y(s) = \mathbf{G}(s) u(s) + \mathbf{Z}(s) p(s) \quad (\text{I.2})$$

Avec:

$y(s) = [y_1(s), y_2(s), \dots, y_r(s)]$: Vecteur de sorties.

$u(s) = [u_1(s), u_2(s), \dots, u_m(s)]$: Vecteur d'entrees.

$p(s) = [p_1(s), p_2(s), \dots, p_q(s)]$: Vecteur de perturbation.

Où :

$\mathbf{G}(s)$: matrice fonction de transfert de dimension $r \times m$, dont les éléments sont les fonctions de transfert $G_{ij}(s)$.

Remarque I.1

Les éléments $G_{ii}(s)$ de la fonction de transfert $G(s)$ du procédé représente les effets principaux entre les commandes et les sorties tandis que les éléments non diagonaux représentent les couplages ou les interactions entre les variables du système.

I.2.4 Matrice fonction de transfert d'un procédé multivariable en boucle fermée

Si on se place maintenant dans le cas fréquent plus simple où le nombre de commandes est égale au nombre de sorties, et on suppose que la régulation fait intervenir un correcteur de fonction de transfert $G_c(s)$, le procédé multivariable sera représenté par un schéma bloc ou chaque bloc symbolise en fait une matrice de fonction de transfert (la figure I.2).

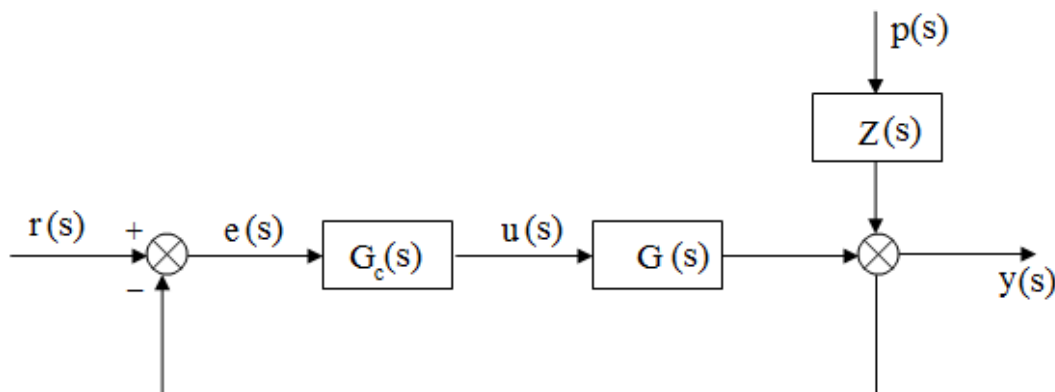


Figure I.2 : Procédé multivariable en boucle fermée.

Où :

$\mathbf{G}_c(s)$: fonction de transfert du correcteur.

$\mathbf{G}(s)$: fonction de transfert du procédé.

$\mathbf{Z}(s)$: fonction de transfert des perturbations.

A partir du schéma de la figure **I.2**, nous avons les équations suivantes :

$$y(s) = \mathbf{G}(s) u(s) + \mathbf{Z}(s) p(s). \quad (\text{I.3})$$

$$y(s) = \mathbf{G}(s) \mathbf{G}_c(s) e(s) + \mathbf{Z}(s) p(s). \quad (\text{I.4})$$

$$y(s) = \mathbf{G}(s) \mathbf{G}_c(s) [e(s) - y(s)] + \mathbf{Z}(s) p(s). \quad (\text{I.5})$$

D'où la relation matricielle en boucle fermie suivante:

$$y(s) = \frac{\mathbf{G}(s) \mathbf{G}_c(s)}{1 + \mathbf{G}(s) \mathbf{G}_c(s)} r(s) + \frac{\mathbf{Z}(s) p(s)}{1 + \mathbf{G}(s) \mathbf{G}_c(s)} \quad (\text{I.6})$$

Si on pose

$$[1 + \mathbf{G}(s) \mathbf{G}_c(s)] = \mathbf{H}(s) \quad \text{et} \quad p(s) = 0, \quad (\text{I.7})$$

il vient:

$$y(s) = \frac{G(s)G_c(s)}{H(s)} r(s). \quad (\text{I.8})$$

Alors, la fonction de transfert en boucle fermée $G_{bf}(s)$ liant $r(s)$ et $y(s)$ est égale à :

$$G_{bf}(s) = \frac{G_{B0}(s)}{H(s)} \quad (\text{I.9})$$

Où :

$$G_{B0}(s) = G(s) G_c(s) \quad (\text{I.10})$$

I.2.5 Représentation par modèle d'état

Il s'agit de décrire le système en considérant sa dynamique interne et non seulement son entrée-sortie. Ainsi il convient de redonner de l'importance à des grandeurs qui ne sont ni l'entrée ni la sortie, tout en tenant compte des phénomènes dynamiques et statiques qui confèrent au système.

Si le système vérifie l'hypothèse de linéarité alors sa représentation d'état est donnée par :

$$\dot{x}(t) = A(t) x(t) + B(t) u(t) \quad (\text{I.11})$$

$$y(t) = C(t) x(t) + D(t) u(t) \quad (\text{I.12})$$

où :

$A(t)$: est la matrice d'état dynamique (d'évolution) de dimension $(n \times n)$.

$B(t)$: est la matrice de commande ou d'entrée de dimension $(n \times m)$.

$C(t)$: est la matrice de mesure ou sortie de dimension $(r \times n)$.

$D(t)$: est la matrice de transition directe de dimension $(r \times m)$.

$x(t)$: est le vecteur d'état de dimension $(n \times 1)$.

$u(t)$: est le vecteur de commande de dimension $(m \times 1)$.

$y(t)$: est le vecteur de sortie de dimension $(r \times 1)$.

Si les matrices $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ et $D(t)$ sont constantes, le système est dit linéaire Temps-Invariant (LTI). Donc la relation (I.11) devient :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (\text{I.13})$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (\text{I.14})$$

I.2.6 Passage de la représentation d'état à la matrice fonction de transfert

Supposons que le système dynamique est modélisé par un modèle d'état suivant :

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (\text{I.15})$$

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t)$$

$$x(0) = x_0$$

où :

$$x \in R^n, u \in R^m, y \in R^r$$

Du fait la linéarité de l'opérateur de Laplace, il possible de l'appliquer aux équations (I.15)

$$s X(s) - x_0 = A X(s) + B U(s) \quad (I.16)$$

$$Y(s) = C X(s) + D U(s)$$

On obtient

$$[s I_n - A] X(s) = x_0 + B U(s)$$

Où :

I_n : Matrice identité de dimension $(n \times n)$.

D'où :

$$X(s) = [s I_n - A]^{-1} x_0 + [s I_n - A]^{-1} B U(s) \quad (I.17)$$

En remplaçant (I.17) dans (I.16), on obtient la formule suivante :

$$Y(s) = C(s I_n - A)^{-1}x_0 + [C(s I_n - A)^{-1}B + D] U(s)$$

Comme la représentation par matrice de fonction de transfert suppose que les

Conditions initiales sont nulles ; alors :

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = C[s I_n - A]^{-1} B + D \quad (\text{I.18})$$

I.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné d'une manière exhaustive, des généralités sur la notion d'un système multivariable, sa représentation par une matrice fonction de transfert en boucle ouverte ainsi qu'en boucle fermée et la représentation par modèle d'état. Nous avons aussi expliqué comment faire le passage de la représentation d'état à la matrice fonction de transfert.

Dans le chapitre qui suit nous donnons un aperçu général sur la commande par modèle interne dans le cas monovariable et dans le cas multivariable.



Chapitre II

II.1 introduction

À la fin des années 70 et au début des années 80 s'est développé un algorithme de commande connu sous le nom de *modèle interne*. Le développement de cet algorithme avait pour objectif de tirer avantage des régulateurs en boucle ouverte. Ces avantages sont la facilité de la synthèse du contrôleur, la possibilité de tenir compte de façon systématique de la robustesse, et les avantages en boucle fermée qui sont la possibilité d'obtenir une erreur nulle en régime permanent à des échelons de consigne ou à des perturbations de moyenne non nulle.

Ce régulateur s'avère être une approche intéressante quand le régulateur PID ne permet pas d'obtenir les performances désirées et que on ne dispose pas d'une puissance de calcul importante pour implémenter un régulateur standard.

La synthèse du régulateur IMC fournit un régulateur simple, offrant de bonnes performances, et pour lequel, le compromis performances/robustesse peut être facilement choisi.

L'objectif de ce chapitre est de donner un aperçu général sur la commande par modèle interne.

II.2 Passage de la régulation classique à la régulation par modèle interne

Considérons la boucle de régulation classique (figure II.1) d'un processus représenté par sa fonction de transfert $G(s)$ un correcteur $f(s)$ un signal d'entrée $r(s)$ un signal de sortie $y(s)$ et une perturbation $p(s)$ en sortie du processus.

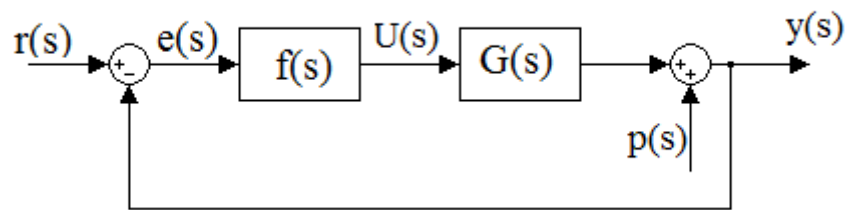


Figure II.1 : Diagramme de bloc d'une commande classique.

D'après cette figure on a l'expression de commande :

$$U(s) = f(s) [r(s) - y(s)] \quad (\text{II.1})$$

Supposons que nous avons à notre disposition un modèle du processus $G(s)$; nous souhaitons intervenir cette connaissance dans la boucle.

La figure II.2 ci –dessous fait intervenir $M(s)$ sans modifier le schéma de régulation

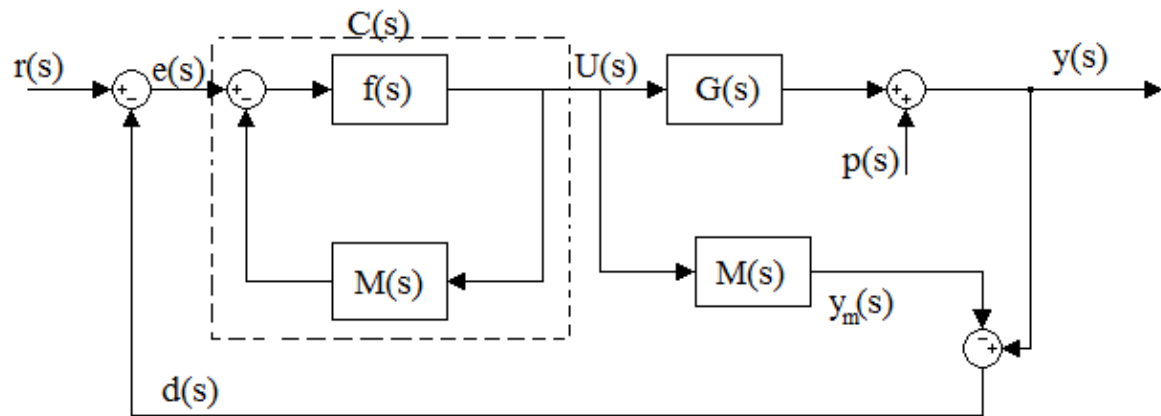


Figure II.2 : Introduction du modèle interne dans la structure de régulation

Le correcteur $C(s)$ est égal a :

$$C(s) = \frac{f(s)}{1+f(s)M(s)} \quad (\text{II.2})$$

Dans le cas de la figure **II.2**, on a la commande sous la forme :

$$U(s) = f(s) [e(s) - M(s)U(s)] \quad (\text{II.3})$$

$$e(s) = r(s) - d(s) \quad (\text{II.4})$$

$$d(s) = y(s) - M(s)U(s) \quad (\text{II.5})$$

En effet les expressions (II.1) et (II.3) sont donc égales, il y a équivalence entre les deux représentations.

Dans le schéma de régulation classique, on suppose que le processus est parfait et on s'en sert pour déterminer le correcteur ou la loi de commande.

Dans le second schéma, on tien compte de l'écart entre le processus et le modèle.

Si on assimile la boucle $[f(s), M(s)]$ à un correcteur $C(s)$ (relation (II.2)) on obtient la structure de commande donnée par la figure II.3.

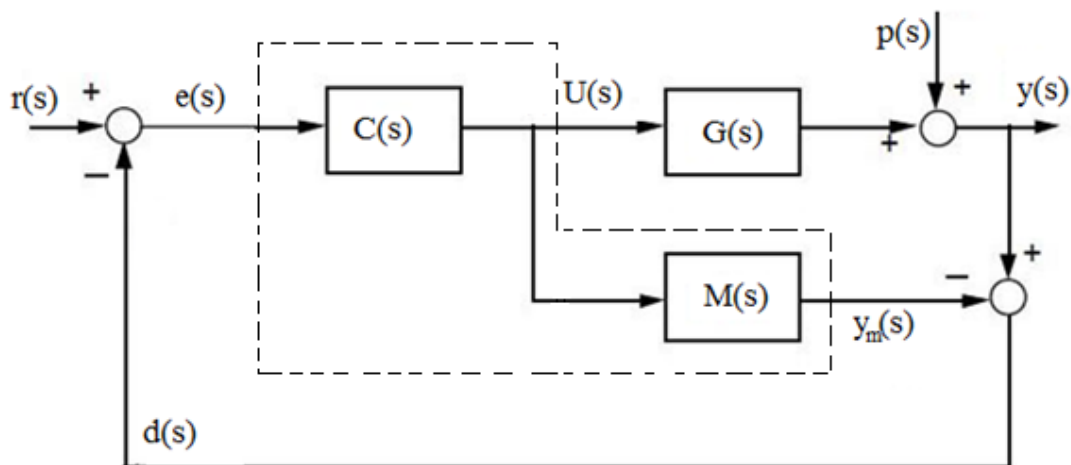


Figure II.3 : Structure de commande par modèle interne

De cette façon, nous avons effectué le passage progressif de la régulation classique à la commande par modèle interne

II.3 Structure de la commande par modèle interne

Comme son nom l'indique la commande par modèle interne (IMC), incorpore une simulation du processus par modèle interne, dont sa structure de commande est schématisée par la figure **II.3**.

$C(s)$ et $M(s)$ sont respectivement les fonctions de transfert du correcteur et du modèle, le procédé est représenté par le transfert $G(s)$ reliant sa sortie à la commande, $p(s)$ est une perturbation non mesurée et additive sur la sortie du procédé.

Dans la structure de commande par modèle interne, la commande $U(s)$ issue du correcteur $C(s)$ est appliquée simultanément au procédé $G(s)$ et à son modèle $M(s)$, la comparaison des sorties génère un signal d'erreur $d(s)$ qui sera comparé avec la consigne $r(s)$ pour donner un signal $e(s)$ qui sera utilisé pour modifier la commande $U(s)$ par le correcteur $C(s)$, à fin de permettre à la commande de mieux piloter le procédé.

Le signal d'erreur $d(s)$ comprend l'influence des perturbations extérieures ainsi que les erreurs de modélisation.

La partie encadrée est la partie de régulation, elle est composée de deux parties :

- Le correcteur
- Le modèle du procédé.

Les propriétés que nous allons décrire s'appliquent bien en temps continu qu'en temps discret, dans le but d'alléger les notations on ne précisera pas dans quel cas où on se place.

Selon la figure **II.3**, on a :

$$U = C (r - d) \quad (\text{II.6})$$

$$d = y - y_m \quad (\text{II.7})$$

$$y = GU + p \quad (\text{II.8})$$

$$y_m = MU \quad (\text{II.9})$$

$$d = p + (G - M) U \quad (\text{II.10})$$

$$U = C(r - p) - C (G - M) U \quad (\text{II.11})$$

$$U (1 + C (G - M)) = C (r - p) \quad (\text{II.12})$$

$$U = \frac{C(r-p)}{1+C(G-M)} \quad (\text{II.13})$$

II.4 Signal du retour

Si on suppose que le modèle est une parfaite représentation du système, alors le signal de retour est égal à l'influence de la perturbation d'après l'équation II.10.

Si le modèle ne traduit pas parfaitement le comportement dynamique du procédé, alors le signal du retour exprime l'influence de perturbation d'une part et de l'erreur de modélisation d'une autre part.

II.5 commande monovariante par modèle interne

II.5.1 Définition et représentation d'un système monovariante

II.5.1.1 Définition

Un système est dit monovariante ou (mono entrée-mono sortie), s'il possède une seule variable de commande et une autre de sortie.

II.5.1.2 Représentation

La figure II.4 suivante représente un procédé monovariante

Avec :

$U(s)$: La commande.

$Y(s)$: La sortie.

$H(s)$: La fonction de transfert en boucle ouverte.

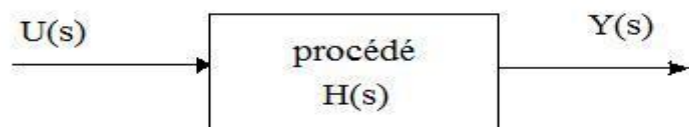


Figure II.4 : Procédé monovariante.

II.5.2 Synthèse du correcteur par modèle interne

II.5.2.1 Expression de $y(s)$

Considérons le schéma de commande de la figure **II.3**

En plus des propriétés que nous avons décrites, selon la figure II.3 on peut ajouter

$$U(s) = C(s) e(s) = c(s) [r(s) - y(s) + y_m(s)] \quad (\text{II.14})$$

D'où:

$$[1 - M(s) C(s)] U(s) = C(s) [r(s) - Y(s)] \quad (\text{II.15})$$

Deux objectifs sont formulés par l'utilisateur :

- Une poursuite de consigne parfaite, soit $y(s) = r(s)$, alors on ne tient pas compte de perturbations.
- Un rejet maximal des perturbations, donc une influence de $P(s)$ minimal.

Dans ces conditions, on constate que pour avoir : $y(s) = r(s)$ lorsque $P(s) = 0$, il suffit que :

$$[1 - M(s) C(s)] = 0 \Leftrightarrow C(s) = \frac{1}{M(s)} \quad (\text{II.16})$$

Cette condition est réalisée lorsque le modèle est parfait, c'est-à-dire $M(s) = G(s)$.

De l'expression (II.8), et en utilisant l'équation (II.15), on déduit l'expression générale de la sortie

$$Y(s) = \frac{G(s)C(s)}{1+C(s)[G(s)-M(s)]} r(s) + \frac{1-C(s)M(s)}{1+C(s)[G(s)-M(s)]} p(s) \quad (\text{II.17})$$

II.5.2.2 Rejet de perturbation

Le rejet de perturbation est étudié en régulation, donc $[r(s) = 0]$, et les perturbations sont parfaitement rejetées lorsque :

$$[1 - M(s)C(s)] = 0 \Leftrightarrow C(s) = \frac{1}{M(s)} \quad (\text{II.18})$$

Qui constitue une condition analogue à la précédente lorsque le modèle est parfait.

Le correcteur théorique est donc donné par la fonction de transfert (II.18) .

Remarque II.1 :

Lorsque le modèle interne parfaitement adapté $M(s) = G(s)$, alors $d(s) = p(s)$ et le bouclage permet d'estimer la perturbation $p(s)$.

Si la perturbation est nulle, $p(s) = 0$ alors $d(s) = 0$, nous retrouvons une structure en boucle ouverte ; mais comme $C(s)$ contient le modèle du processus, nous retrouvons la commande classique, en effet :

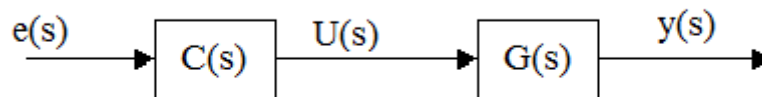


Figure II.5 : structure de régulation dans le cas idéal

Le correcteur donné par la relation (II.18) est irréalisable physiquement, lorsque le degré du dénominateur de la fonction de transfert du procédé est strictement supérieur au degré du numérateur de cette fonction de transfert. De plus, les zéros à partie réelle positive et les retards purs posent une difficulté.

Les zéros à partie réelle positive du procédé seraient des pôles pour le correcteur et le rendraient instable.

Les retards purs du procédé fourniraient des avances pures du correcteur, donc celui-ci serait irréalisable physiquement.

Pour ces raisons, la conception du modèle interne se fait par la méthode de Frank.

III.5.2.3 Méthode de Frank

Elle se fait en deux étapes :

➤ **Etape n°1 :**

On décompose le modèle $M(s)$ du procédé sous la forme d'un produit de deux facteurs, le premier $M^+(s)$ (dont le gain sera pris égal à 1) contenant les retards purs et les zéros à partie réelles positive :

$$M(s) = M^+(s).M^-(s) \quad (\text{II.19})$$

➤ **Etape n° 2 :**

On retient seulement $M^-(s)$ (pour écarter les retards purs et les zéros à partie réelle positive) et on filtre l'inverse de $M^-(s)$ (pour rendre le correcteur réalisable physiquement). La fonction de transfert du correcteur réel est alors égale à :

$$C(s) = \frac{1}{M^-(s)} F(s) \quad (\text{II.20})$$

Où $F(s)$ est un filtre passe-bas de gain égal à 1. Il est ajouté de façon à robustifier le système vis-à-vis des erreurs de modèle. Ce filtre est typiquement de la forme :

$$F(s) = \frac{1}{(fs+1)^n} \quad (\text{II.21})$$

Où f est la constante de temps souhaitée en boucle fermée, l'exposant n est choisi de telle façon que $C(s)$ soit une véritable fonction de transfert (le degré du dénominateur est supérieur ou égal au degré du numérateur).

Avec les précautions prises (décomposition en deux facteurs précédents) le correcteur est physiquement réalisable et stable.

Remarque II.2 :

La méthode de commande par modèle interne est basée sur l'élimination des zéros et des retards purs, il ne faut pas l'utiliser pour des systèmes instables en boucle ouverte.

Dans le cas idéal ou le modèle est parfait [$M(s)=G(s)$], la sortie est égal à :

$$y(s) = M^+(s) F(s) r(s) + [1 - M(s) F(s)] p(s) \quad (\text{II.22})$$

Et de manière général égal on a :

$$y(s) = \frac{G(s)F(s)}{M^-(s)+F(s)[G(s)-M(s)]} r(s) + \frac{M(s)-G(s)F(s)}{M^-(s)+F(s)[G(s)-M(s)]} p(s) \quad (\text{II.23})$$

II.6 Commande multivariable par modèle interne

La commande par modèle interne est développée en multivariable de la même manière que le système monovariable.

Le schéma de commande multivariable est donné par la figure suivante

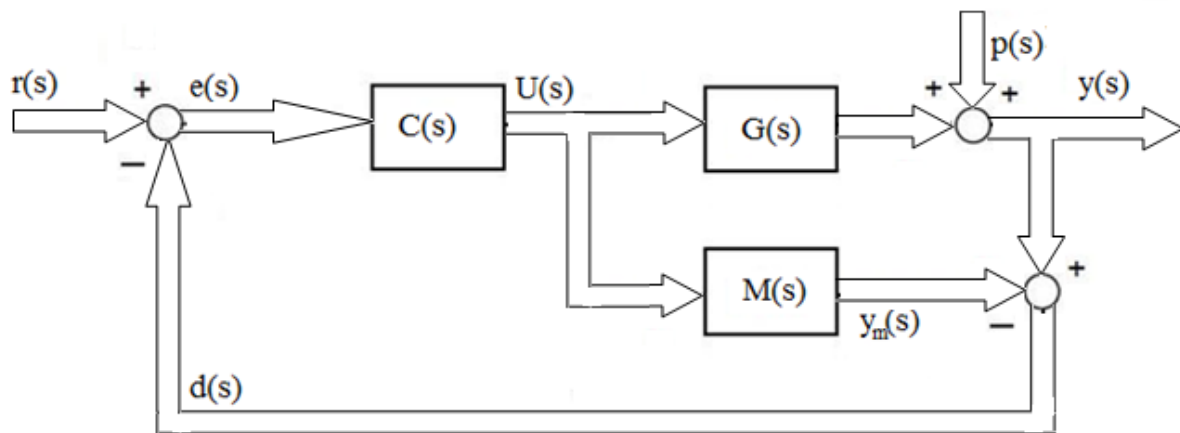


Figure II.6 : Commande multivariable par modèle interne

II.6.1 Synthèse d'un procédé de commande par modèle interne

La commande par modèle interne consiste à négliger les interactions $G_{ij}(s)$ ($i \neq j$) donc à considérer le procédé comme constitué de m sous systèmes monovariabes évoluant en parallèle.

La synthèse d'une commande par modèle interne multivariables passe par les étapes suivantes :

1. Détermination de la meilleure configuration de commande.
2. Choix de la loi de commande pour chaque boucle de commande et détermination des paramètres des correcteurs.

Etape 1 : Détermination de la configuration de commande

Le choix de la meilleure configuration de commande est un principe fondamental pour la commande par modèle interne, elle est basée sur l'analyse des interactions présentes entre les entrées et les sorties, le choix porte sur la configuration de la commande dont les boucles sont stables et présentent un faible niveau d'interactions entre elles.

Etape 2 : Choix de la loi de commande pour chaque boucle

La commande d'un processus industriel, s'appuie sur deux grandes familles de méthodes et d'outils associés qui se distinguent par la connaissance plus ou moins préalable que l'on a de comportement dynamique du procédé industriel concerné.

La première est une approche algorithmique basée sur un modèle mathématique dans son comportement. Elle comprend notamment les méthodes de synthèse dans le domaine temporel ou fréquentiel.

En plus de la première approche qui est plus ancienne, il existe une deuxième approche de développement la plus récente est appelée approche heuristique, elle repose sur une description empirique de la réponse du procédé à diverses sollicitations externes.

Une fois la configuration de commande est obtenue et selon les performances diverses (rapidité, stabilité et précision), on choisi la loi de commande pour chaque boucle et on détermine les paramètres de chaque correcteur.

II.6.2 Analyse des interactions et la commande IMC

Une grande partie des problèmes de régulation peut être résolu par des correcteurs classiques de type PID et des correcteurs flous, l'objectif principal de l'analyse des interactions dans les procédés multivariables est de choisir une configuration de commande dont les interactions entre les boucles seront très faibles, permettant ainsi, d'appliquer la commande IMC, en s'intéressant au réglage individuel des boucles de commande.

II.6.3 Choix de la meilleure configuration de commande pour un procédé 2×2

Lors de la conception d'une commande IMC pour un procédé à deux entrées et deux sorties, il existe deux combinaisons possibles de couples entrées-sorties comme il est montré par les figures suivantes :

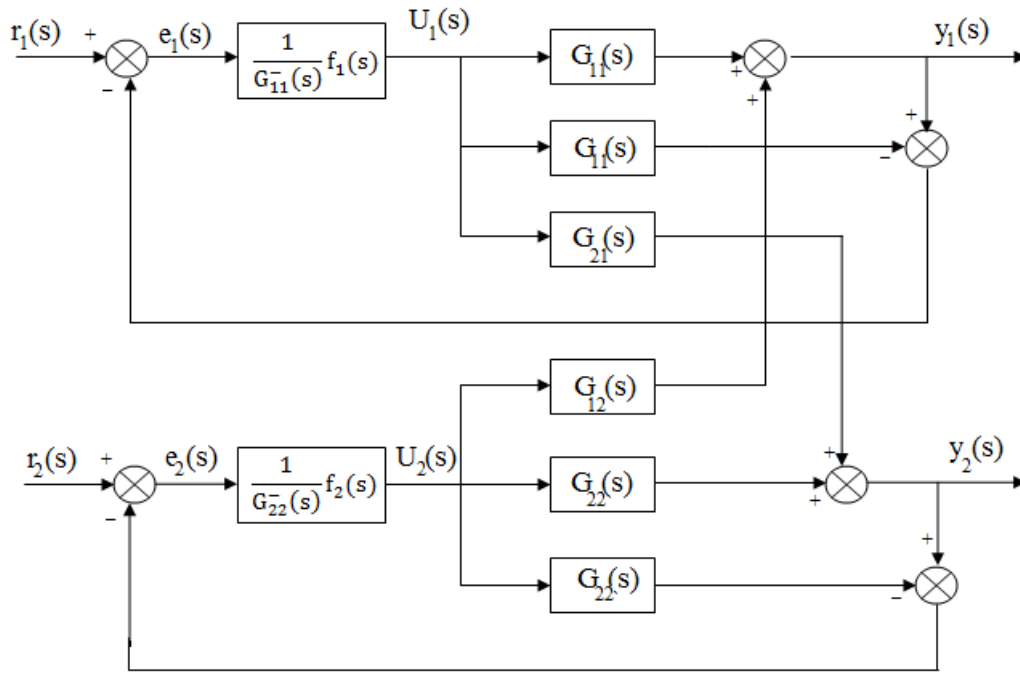


Figure II.7 : commande IMC $[y_1-U_1], [y_2-U_2]$

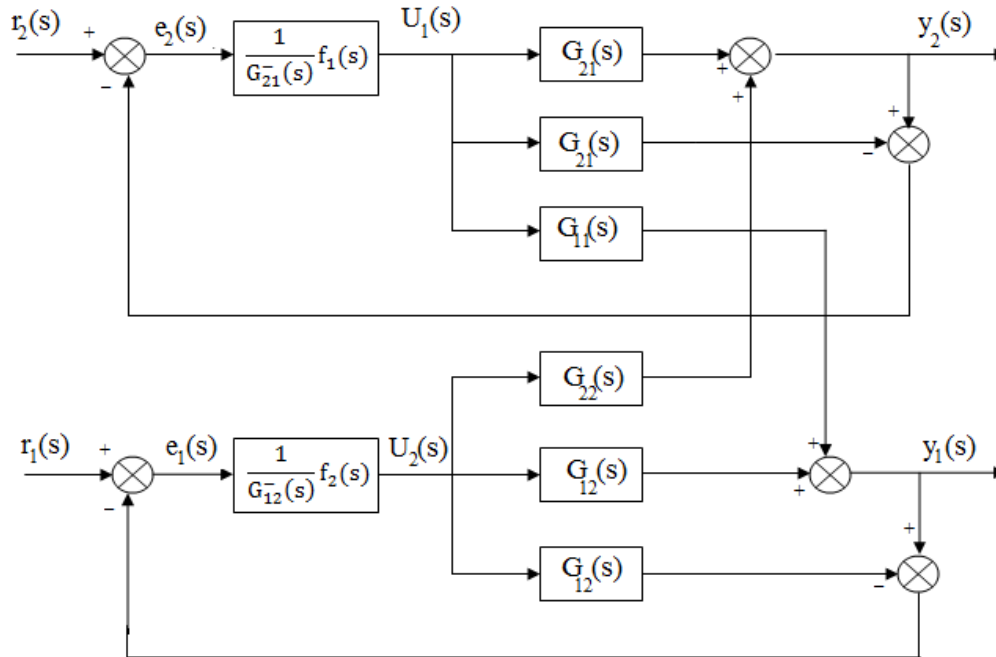


Figure II.8 : commande IMC $[y_1-U_2], [y_2-U_1]$

II.6.4 Conception d'un correcteur MIMO dans un environnement multiboucle

Soit $G(s)$ la matrice fonction de transfert du processus à commander.

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & \dots & G_{1m}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & \dots & G_{2m}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{m1}(s) & G_{m2}(s) & \dots & G_{mm}(s) \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Le modèle de processus $M(s)$ est :

$$M(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & G_{22}(s) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & G_{mm}(s) \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Le correcteur multivariable $C(s)$ est le suivant :

$$C(s) = \begin{bmatrix} C_{11}(s) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_{22}(s) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_{mm}(s) \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Le correcteur idéal correspondant à une erreur stationnaire nulle et un rejet parfait de perturbation est obtenu en prenant :

$$C(s) = [M(s)]^{-1} \quad (\text{II.27})$$

En effet un tel correcteur n'est pas réalisable physiquement si le modèle $M(s)$ contient des retards ou des zéros instables.

Pour éviter ces problèmes, on procède à une factorisation de la matrice fonction de transfert du modèle selon la méthode de Frank :

$$M(s) = M^+(s) \cdot M^-(s) \quad (\text{II.28})$$

De telle manière que $M^+(s)$ contient les retards et les zéros instables. Ainsi, $[M^+(s)]^{-1}$ est un correcteur physiquement réalisable et on choisit :

$$C(s) = [M^+(s)]^{-1} F_i(s) \quad i=1, \dots, m \quad (\text{II.29})$$

Avec $F_i(s)$, $i=1, \dots, m$ est un filtre passe bas multivariable à gain unitaire, de forme :

$$F_i(s) = \frac{1}{(f_i s + 1)^{n_i}} \quad i=1, \dots, m \quad (\text{II.30})$$

La relation (II.29) est équivalente à l'équation suivante :

$$C_{ii}(s) = \frac{1}{g_{ii}^-(s)} F_i(s) \quad i=1, \dots, m \quad (\text{II.31})$$

La condition nécessaire pour la stabilité de la structure de commande IMC est :

$$\|C(s) \cdot (G(s) - M(s))\| < 1 \quad (\text{II.32})$$

$$\|(G(s) - M(s)) \cdot C(s)\| < 1 \quad (\text{II.33})$$

Où :

$\| \cdot \|$: est la norme de convergence moyenne.

Ces deux relations montrent que la stabilité du procédé en boucle fermée est assurée si le gain de la boucle est inférieur à 1.

Il est important de noter que le passage du procédé (II.24) au modèle (II.25), les éléments hors diagonale sont éliminés, ce qui engendre une erreur de modélisation. Le filtre $F_i(s)$, doit être conçu pour préserver la stabilité du procédé de commande en présence de telle erreur de modélisation. La condition de stabilité donnée par les équations (II.32) et (II.33) «< théorème de petit gain >>» est employée pour dériver les conditions suffisantes de stabilité de la stratégie de commande par modèle interne.

Remarque II.3

Le dénominateur de chaque équation dépend de la configuration de commande choisie.

Dans le cas de fortes interactions, dues aux éléments hors diagonales, les dénominateurs des équations (II.32) et (II.33) seront très grands, ce qui limite l'ajustement des paramètres des filtres $F_i(s)$, donc l'action des correcteurs.

II.7 Conclusion

Les principes théoriques de base de la structure IMC ont été décrits dans ce chapitre. Pour les systèmes stables et en absence d'erreur de modélisation, la commande opère en boucle ouverte. La stabilité de la boucle fermée est alors simplement assurée en choisissant un correcteur IMC stable. Aussi les caractéristiques de performance sont reliées aux paramètres du correcteur.

La commande par modèle interne permet de prendre en compte les effets d'une désadaptation modèle-procédé d'une part et d'une perturbation additive en sortie du procédé d'une autre part. La désadaptation intervient dans la condition de stabilité de la structure bouclée.

Un filtre est alors introduit au niveau de signal d'écart dans le but d'assurer une certaine robustesse de stabilité en modérant la prise en compte des écarts de comportement constatés dans la modification de la commande qui sera appliquée au procédé.

Lorsque la constante de temps est très importante, la correction issue de ce filtre sera très lente et va se répercuter sur le rejet de perturbation qui le sera également. Nous avons souligné que la IMC était réservée aux processus stables en boucle ouverte. Dans le cas contraire, une préstabilisation par une boucle locale est nécessaire avant d'appliquer la commande IMC.



Chapitre III

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons faire une application sur Simulink de la commande par Modèle interne d'un système hydraulique non linéaire multivariable à trois réservoirs (three tank system DTS 200).

Nous allons étudier la poursuite et le rejet des perturbations.

III.2 Description de la station (3 tank system DTS-200)

Le système « 3 tank system DTS-200 » est donné par la Figure III.1.

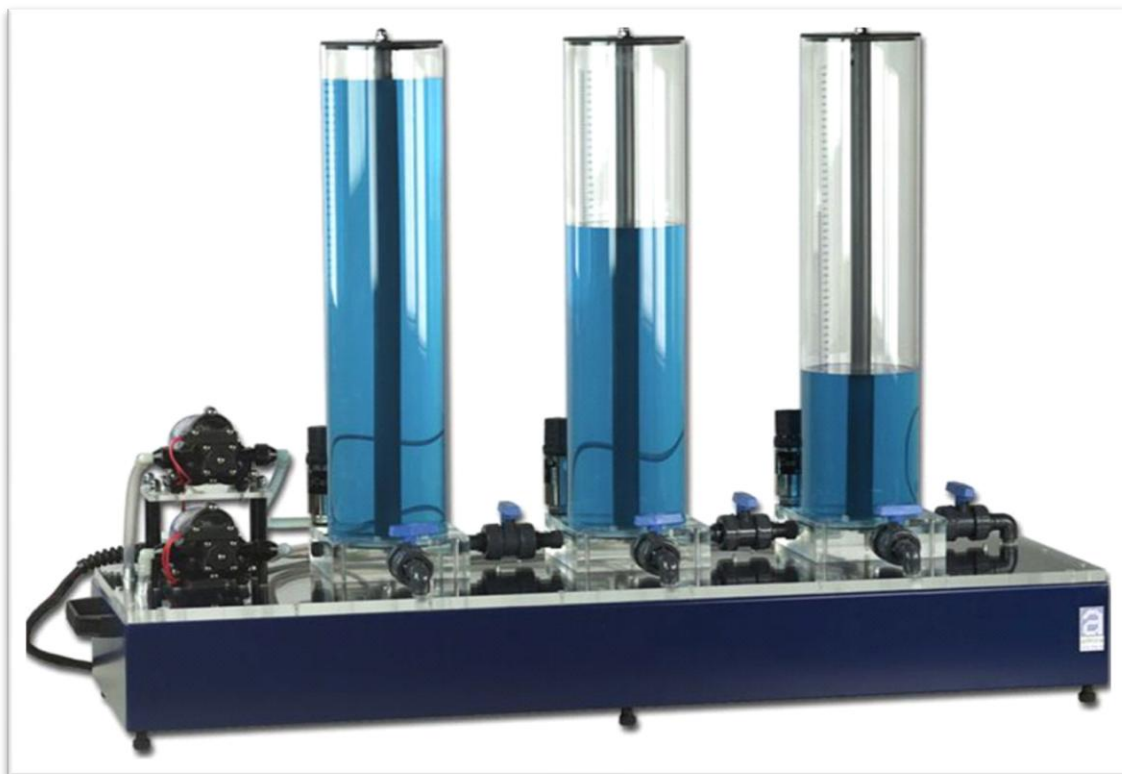


Figure III.1 : la station three tank système DTS 200

C'est un système hydraulique, multivariables non linéaire, produit par la société

AMIRA GmbH (Duisburg, Allemagne). Il est composé de trois réservoirs cylindriques en plexiglass T1, T2 et T3, de section identique A , qui sont reliés entre eux en série par des tuyaux de raccords. Le liquide (eau distillé) se vide du réservoir T2 vers le réservoir principale, à partir duquel les pompes P1 et P2 alimentent les réservoirs T1 et T2, les trois réservoirs sont équipés de capteurs de pression piézo-resistifs pour mesurer les niveaux du liquides dans les trois réservoirs, les tuyaux de raccords de section S_p . sont équipés de vannes a réglage manuel.

- L'écoulement entre le réservoir T1 et le réservoir T3 s'effectue par la vanne V1.
- L'écoulement entre le réservoir T3 et le réservoir T2 s'effectue par la vanne V2.
- La sortie du réservoir T2 vers le réservoir principale es affecte par V3.

Le système donne également la capacité de simuler des fuites des réservoirs T1, T2 et T3 vers le réservoir principale par les vanne V4, V5 et V6.

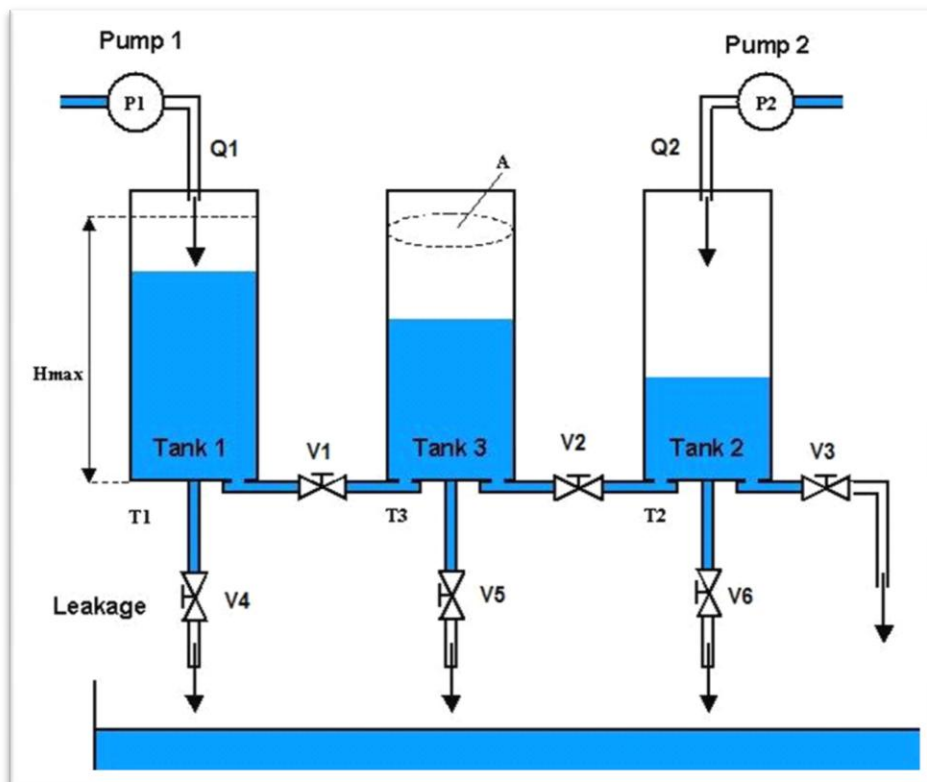


Figure III-2 : Schéma de la station DTS 200

La DTS-200 Three-Tank-System se qualifie pour une utilisation dans des projets de recherche en matière de contrôle non linéaire et le diagnostic de pannes. En utilisant un prototype de la DTS-200, les chercheurs dans le département de mesure et de contrôle à l'Université de Duisburg ont testé avec succès les méthodes de découplage non linéaire et le modèle de diagnostic de pannes.

III.2.1 Données technique du système

- A : section des réservoirs T1, T2 et T3.
- C_{13} : paramètre de l'écoulement entre les réservoirs T1 et T3.
- C_{32} : paramètre de l'écoulement entre les réservoirs T2 et T3.
- C_{20} : paramètre de l'écoulement entre le réservoir T2 et le réservoir principal.
- h_{max} : la hauteur maximale des réservoirs.

Tel que

$$C_{ij} = S_p \mu_{ij} \sqrt{2g}$$

Avec

- μ_{ij} : le coefficient de perte de charge.
- S_p : section du tuyau de raccordement.
- g : gravité terrestre (en Algérie $g = 9.81$).

$$A = 0.0154 \text{ m}^2.$$

$$C_{13} = C_{32} = 0.9 \text{ e-004}.$$

$$C_{20} = 2 \text{ e-004}.$$

$$h_{max} = 0.65\text{m}$$

$$Q_{1max} = 7.2079 \text{ e-005 } m^3/s.$$

$$Q_{2max} = 7.2738 \text{ e-005 } m^3/s.$$

III.2.2 Les états des vannes au cours de l'expérience

- Les vannes V1, V2 et V3 étaient complètement ouverts.
- Les vannes V4, V5 et V6 étaient complètement fermes (elles servent à crier des perturbations).

III.2.3 Description mathématique du système

Le système non linéaire multivariable est décrit par les équations différentielles suivantes:

$$A \frac{\partial h_1}{\partial t} = Q_1 - C_{13} \sqrt{h_1 - h_3}$$

$$A \frac{\partial h_2}{\partial t} = Q_2 + C_{32} \sqrt{h_3 - h_2} - C_{20} \sqrt{h_2}$$

$$A \frac{\partial h_3}{\partial t} = C_{13} \sqrt{h_1 - h_3} - C_{32} \sqrt{h_3 - h_2}$$

$$Y_1 = h_1$$

$$Y_2 = h_2$$

III.3 Commande par modèle interne

Pour assurer un suivi parfait de la consigne, le correcteur doit être égal à l'inverse du modèle. Cependant, l'inversion de manière directe est pratiquement irréalisable, car le degré du numérateur devient supérieur à celui du dénominateur d'où l'intérêt d'ajouter un filtre de type : $\frac{1}{(fs+1)^n}$

III.3.1 Linéarisation autour d'un point de fonctionnement

La commande par modèle interne incorpore une simulation du processus par modèle interne dans sa structure de commande, et pour obtenir ce modèle on doit linéariser le système autour d'un point de fonctionnement.

III.3.1.1 Point de fonctionnement

- h_{10} : le niveau d'eau dans le réservoir T1.
- h_{20} : le niveau d'eau dans le réservoir T2.
- h_{30} : le niveau d'eau dans le réservoir T3.
- Q_{10} : le débit de la pompe P1.
- Q_{20} : le débit de la pompe P2.

$$h_{10} = 0.3 \text{ m}$$

$$h_{20} = 0.15 \text{ m}$$

$$h_{30} = 0.225 \text{ m}$$

$$Q_{10} = 2.46 \text{ e-5 } m^3/s.$$

$$Q_{20} = 5.28 \text{ e-5 } m^3/s.$$

III.3.1.2 Linéarisation

On pose

$$h = (h_1, h_2, h_3)$$

$$Q = (Q_1, Q_2)$$

$$f = \dot{h} = (\dot{h}_1, \dot{h}_2, \dot{h}_3)$$

$$g = (h_1, h_2)$$

La linéarisation s'obtient comme suit :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial h_1} & \frac{\partial f_1}{\partial h_2} & \frac{\partial f_1}{\partial h_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial h_1} & \frac{\partial f_2}{\partial h_2} & \frac{\partial f_2}{\partial h_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial h_1} & \frac{\partial f_3}{\partial h_2} & \frac{\partial f_3}{\partial h_3} \end{bmatrix}_{\substack{h = h_0 \\ Q = Q_0}}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial Q_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial Q_1} & \frac{\partial f_2}{\partial Q_2} \\ \frac{\partial f_3}{\partial Q_1} & \frac{\partial f_3}{\partial Q_2} \end{bmatrix}_{\substack{h = h_0 \\ Q = Q_0}}$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial h_1} & \frac{\partial g_1}{\partial h_2} & \frac{\partial g_1}{\partial h_3} \\ \frac{\partial g_2}{\partial h_1} & \frac{\partial g_2}{\partial h_2} & \frac{\partial g_2}{\partial h_3} \end{bmatrix}$$

$h = h_0$
 $Q = Q_0$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial g_1}{\partial Q_2} \\ \frac{\partial g_2}{\partial Q_1} & \frac{\partial g_2}{\partial Q_2} \end{bmatrix}$$

$h = h_0$
 $Q = Q_0$

III.3.1.3 Modèle linéaire

Le modèle linéaire est :

Matrice d'évolution

$$A = \begin{bmatrix} -0.0107 & 0 & 0.0107 \\ 0 & -0.0274 & 0.0107 \\ 0.0107 & 0.0107 & -0.0214 \end{bmatrix}$$

Matrice de commande

$$B = \begin{bmatrix} 64.935 & 0 \\ 0 & 64.935 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Matrice de sortie

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Matrice de transition directe

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

III.3.1.4 Matrice fonction de transfert

Le calcul de la matrice fonction de transfert se fait par la relation suivante :

$$G(s) = C(SI - A)^{-1} B + D$$

$$MFT = \begin{bmatrix} \frac{64.94s^2 + 3.162s + 0.03046}{s^3 + 0.0594s^2 + 0.0008757s + 1.883e-6} & \frac{0.007434}{s^3 + 0.0594s^2 + 0.0008757s + 1.883e-6} \\ \frac{0.007434}{s^3 + 0.0594s^2 + 0.0008757s + 1.883e-6} & \frac{64.94s^2 + 2.078s + 0.007365}{s^3 + 0.0594s^2 + 0.0008757s + 1.883e-6} \end{bmatrix}$$

III.3.2 Modèle approché

Le système est un procédé multivariable (2x2) caractérisé par le phénomène d'interactions, alors on doit les négliger pour tenir compte des exigences pratiques, tel que l'évolution des sorties indépendamment les unes des autres, alors notre modèle approché est :

$$M(s) = \begin{bmatrix} \frac{64.94s^2 + 3.162s + 0.03046}{s^3 + 0.0594s^2 + 0.0008757s + 1.883e-6} & 0 \\ 0 & \frac{64.94s^2 + 2.078s + 0.007365}{s^3 + 0.0594s^2 + 0.0008757s + 1.883e-6} \end{bmatrix}$$

Le schéma de simulation du modèle approché est représenté sur la figure **III.5**

In1 est la commande Q_1

In2 est la commande Q_2

Out1 est la sortie y_{m1} du modèle approché

Out2 est la sortie y_{m2} du modèle approché

$$\frac{num3}{den3} = \frac{64.94s^2 + 3.162s + 0.03046}{s^3 + 0.0594s^2 + 0.0008757s + 1.883e-6}$$

Les zéros de cette fonction de transfert sont :

$$Z_1 = -0,0355.$$

$$Z_2 = -0,0132.$$

$$\frac{num6}{den3} = \frac{64.94s^2 + 2.078s + 0.007365}{s^3 + 0.0594s^2 + 0.0008757s + 1.883e - 6}$$

Les zéros de cette fonction de transfert sont :

$$Z_1 = -0,0279.$$

$$Z_2 = -0,0041.$$

La notion de stabilité est très importante dans la commande *IMC*, d'après ce qui a été vu précédemment, pour qu'il y ait stabilité, il faut que les valeurs propres de la matrice $M(s)$ soient à partie réelle strictement négative.

$$\begin{cases} P_1 = -0.0372 \\ P_2 = -0.0196 \\ P_3 = -0.0026 \end{cases}$$

On constate que les valeurs propres sont réelles négatives ce qu'implique que le système est stable.

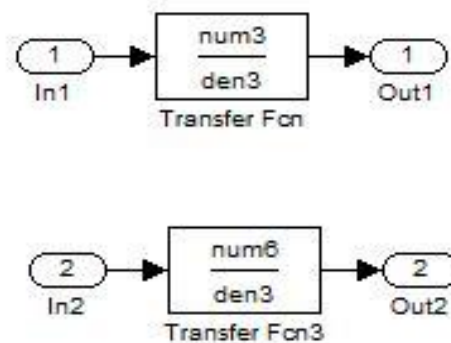


Figure III-5 : Schéma du modèle approché.

III.3.3 Correcteur IMC

Le correcteur est égal à l'inverse du modèle approché et comme le degré du numérateur est supérieur à celui du dénominateur, alors on ajoute un filtre.

Selon la méthode IMC, la fonction de transfert du correcteur est donnée par :

$$C(s) = [M_{ii}^{-1}(s)] F_i(s) \quad i=1, \dots, m$$

Tel que

$M_{ii}^{-1}(s)$: est la partie inversible de $M_{ii}(s)$

$F_i(s)$: est un filtre passe-bas, dans notre cas, il est de forme

$$F_i(s) = \frac{1}{(f_i s + 1)^{n_i}} \quad i=1, \dots, m$$

Et comme les zéros de ce modèle approché sont stables et qu'on n'a pas de retard pur alors :

$$M^{-1}(s) = M(s)$$

Alors la matrice fonction de transfert du correcteur est:

$$C(s) = \begin{bmatrix} \frac{s^3 + 0.0594s^2 + 0.0008757s + 1.883e-6}{(f_1 s + 1)^{n_1} (64.94s^2 + 3.162s + 0.03046)} & 0 \\ 0 & \frac{s^3 + 0.0594s^2 + 0.0008757s + 1.883e-6}{(f_2 s + 1)^{n_2} (64.94s^2 + 2.078s + 0.007365)} \end{bmatrix}$$

On choisit n_i pour avoir C_{ii} propre, tel que $n_1=n_2=1$.

Sachant que f_1 et f_2 sont des paramètres à ajuster pour avoir la réponse désirée en boucle fermée. Après l'ajustement, on constate que le meilleur réglage correspond aux valeurs suivantes

$$f_1=5.8$$

$$f_2=2.6$$

On ajoute les saturations pour que les deux commandes ne dépassent pas un certain seuil maximum.

$$Q1_{max} = 7.2079 \text{ e-}5 \text{ m}^3/\text{s}.$$

$$Q2_{max} = 7.2738 \text{ e-}5 \text{ m}^3/\text{s}.$$

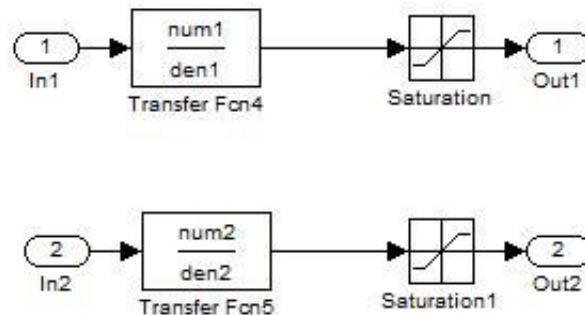


Figure III.6 : Schéma du correcteur IMC.

In1 est l'erreur r_1-d_1

In2 est l'erreur r_2-d_2

Out1 est la commande Q_1

Out2 est la commande Q_2

$$\frac{num1}{den1} = \frac{s^3 + 0.0594s^2 + 0.0008757s + 1.883e - 6}{(f_1s + 1)^{n_1}(64.94s^2 + 3.162s + 0.03046)}$$

$$\frac{num2}{den2} = \frac{s^3 + 0.0594s^2 + 0.0008757s + 1.883e - 6}{(f_2s + 1)^{n_2}(64.94s^2 + 2.078s + 0.007365)}$$

III.3.4 Système non linéaire

En considérant les equations differentielles du système, on réalise le schema de simulation suivant :

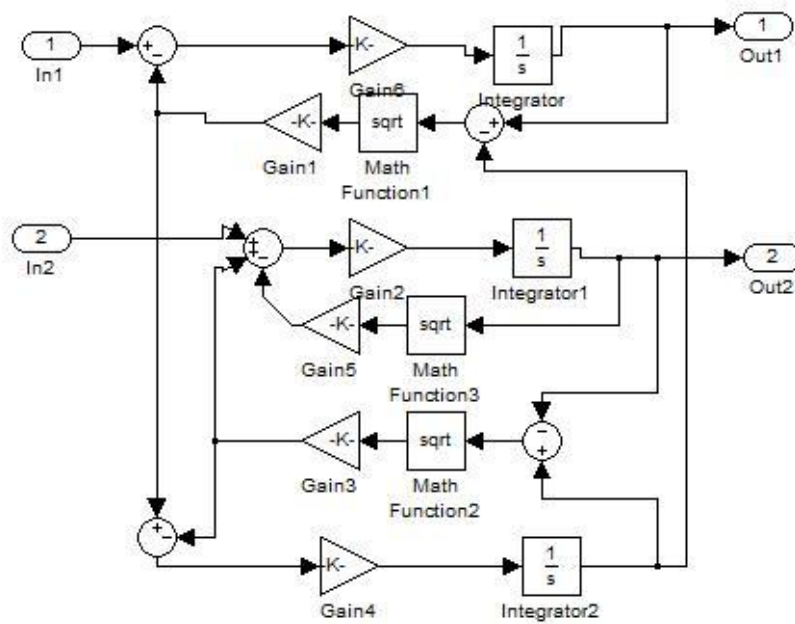


Figure III.4 : Système non linéaire.

In1 est la commande Q_1

In2 est la commande Q_2

Out1 est la sortie y_1

Out2 est la sortie y_2

III.3.5 Schema de simulation global

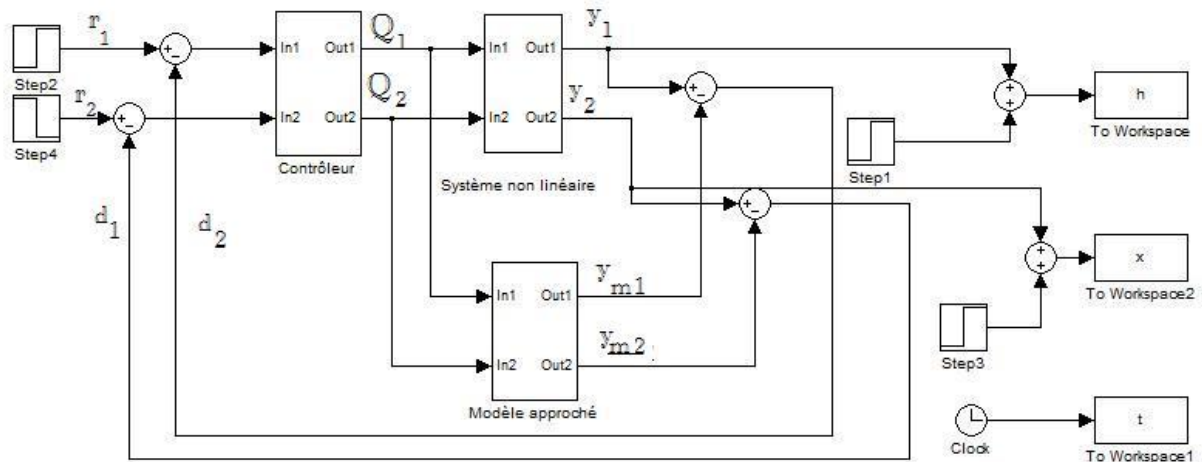
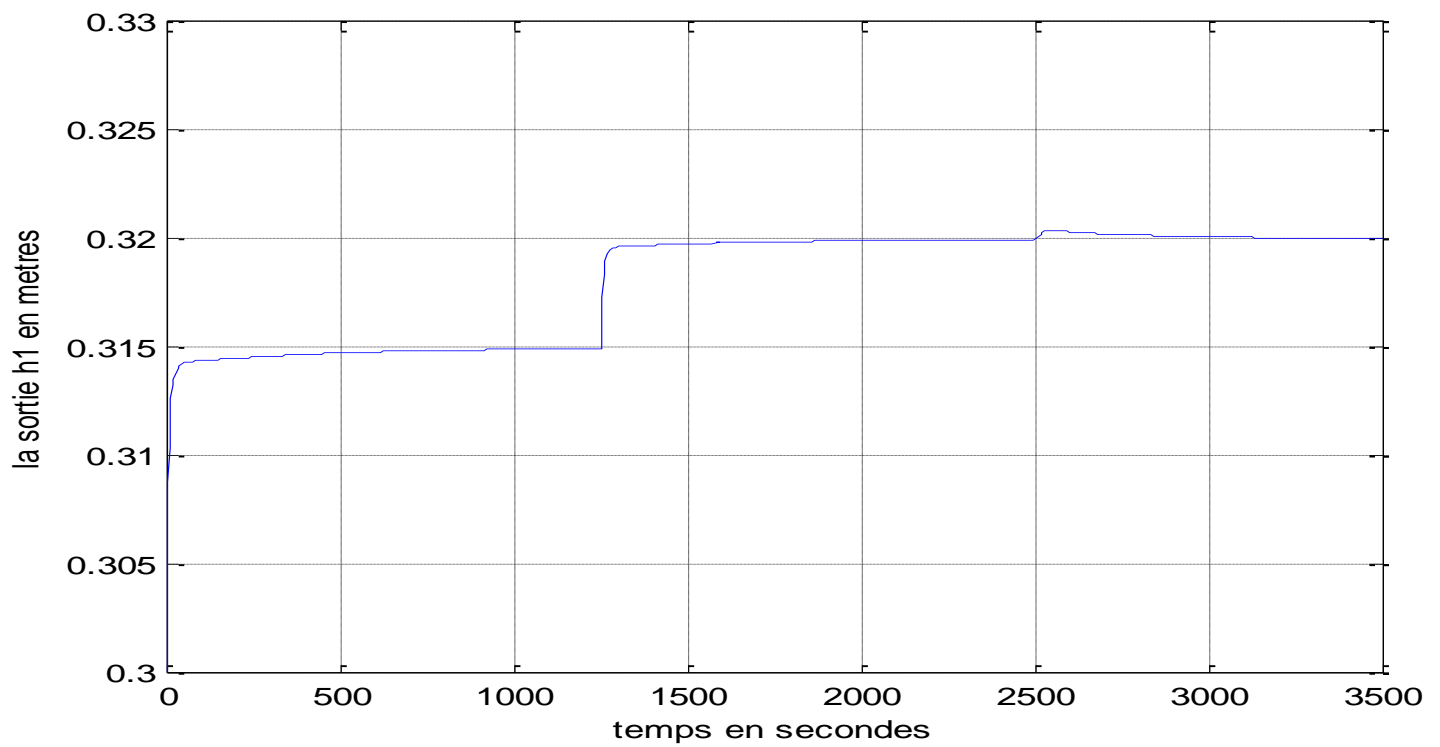
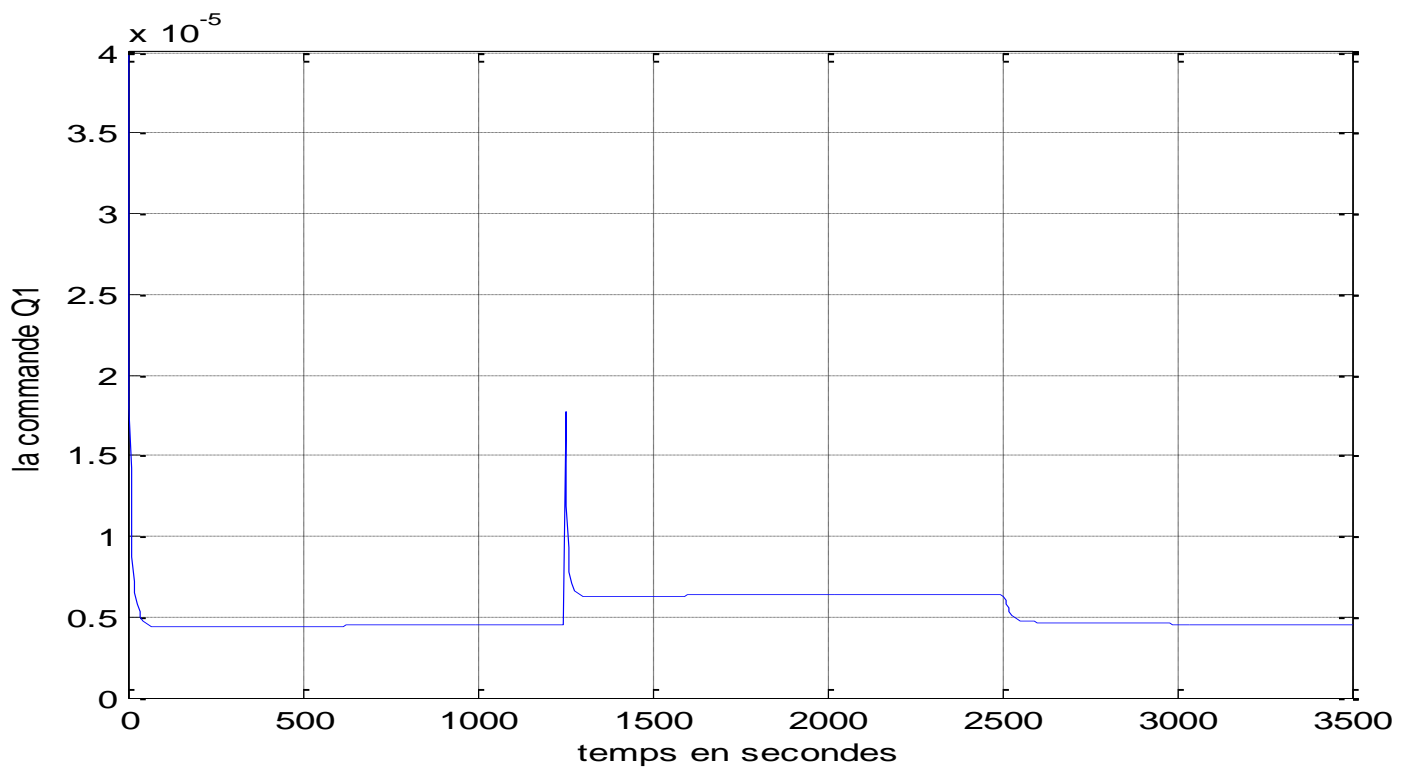
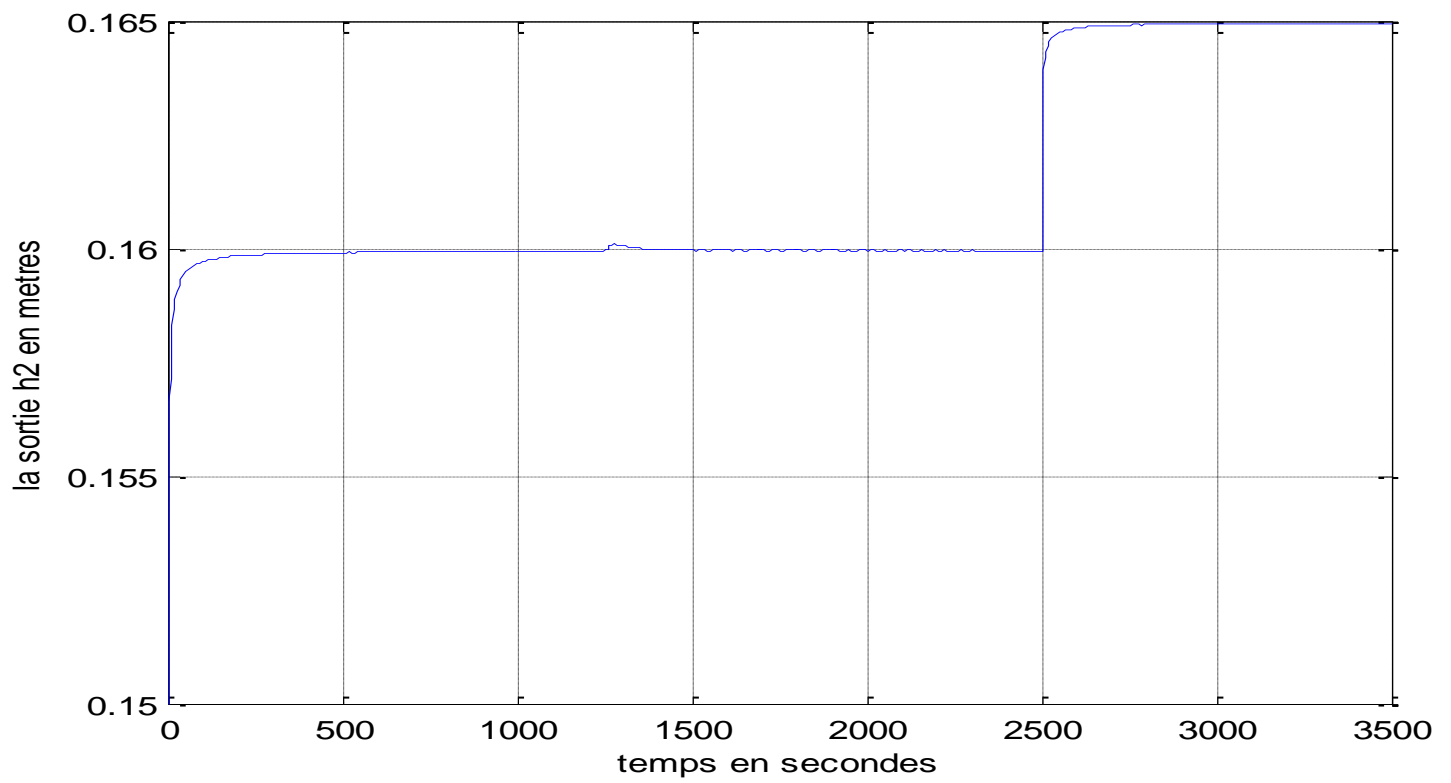
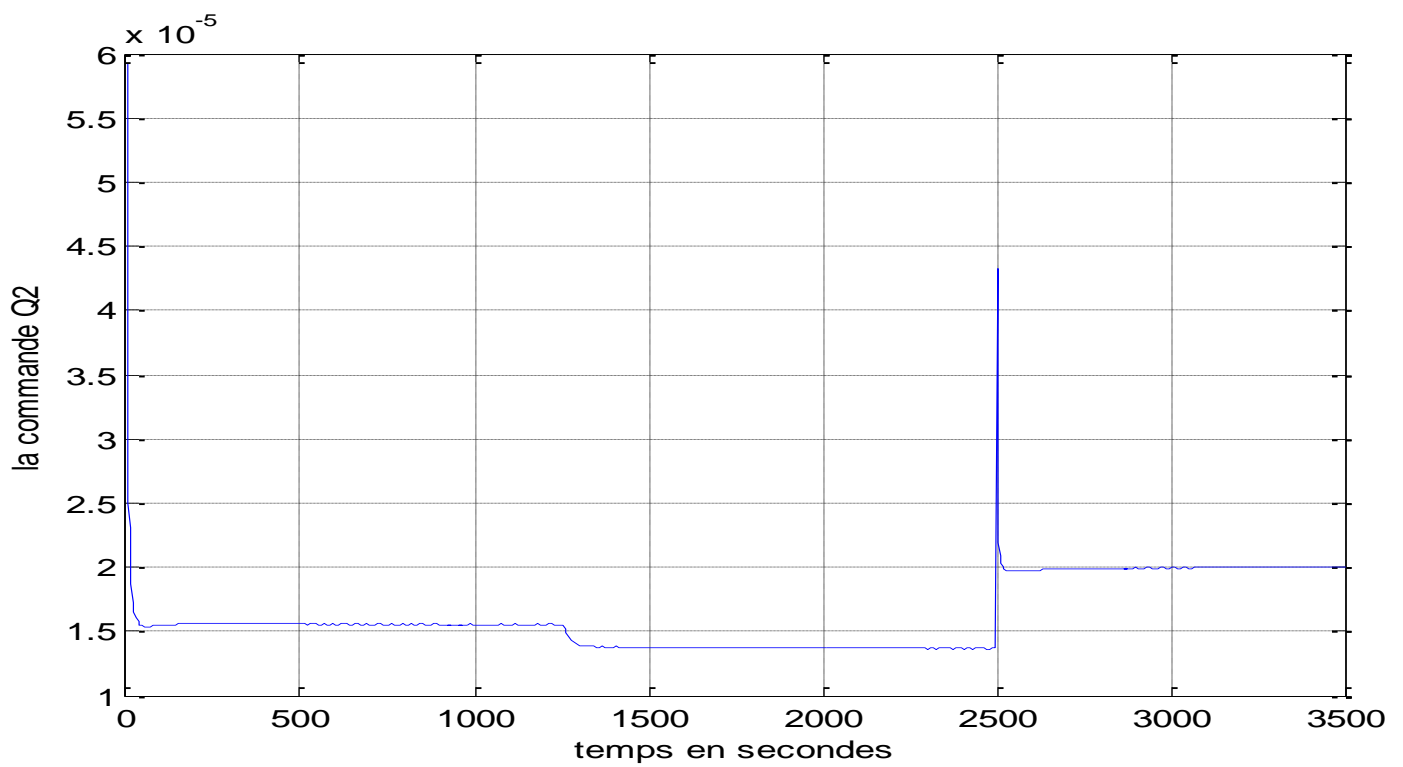


Figure III.3 : Schéma de simulation global

III.4 Changement de consignes

On soumet le procédé à une variation de consigne de moins 10% de notre point de fonctionnement, c'est à dire 10% de h_{10} et h_{20} et relever les courbes Q_1 , Q_2 , h_1 et h_2 et voir la poursuite.

**Figure III.7:** Evolution de la sortie h_1 **Figure III.8:** Evolution de la commande Q_1

**Figure III.9:** Evolution de la sortie h_2 **Figure III.10:** Evolution de la commande Q_2

En imposant des consignes $r_1=0.015$ et $r_2=0.01$ au même temps, la réponse h_1 est atteinte (c'est-à-dire pas d'écart statique) avec un temps de réponse $tr_{5\%}=45.22$ secondes et une constante de temps $\tau = 7.23$ secondes (voire figure **III.7**). La sortie h_2 est aussi atteinte avec un temps de réponse $tr_{5\%}=51.22$ secondes et une constante de temps $\tau=5.1$ secondes (voir figure **III.9**).

A $t=1250$ secondes, on soumet le procédé à une variation cosigne de r_1 de 0.015 mètres à 0.02 mètres, on a une réponse h_1 qui atteint sa nouvelle consigne avec un temps de réponse $tr_{5\%} = 193.3$ secondes et une constante de temps $\tau=7.2$ secondes (voire figure **III.7**).

A $t=2500$ on soumet le procédé à une variation cosigne r_2 de 0.01 mètres à 0.015 mètres, on a une réponse h_2 qui atteint sa nouvelle consigne avec un temps de réponse $tr_{5\%} = 44.7$ secondes et une constante de temps $\tau=3.23$ secondes (voir figure **III.9**).

La cosigne influe sur la rapidité du système (pour des grandes consignes le système répond rapidement et pour des faibles consignes le système répond lentement). Ce comportement est justifié par la non linéarité du système.

Les figure **III.7** et figure **III.9** montrent une influence de h_1 sur h_2 a $t=1250$ secondes mais elle va être corrigée par le correcteur car la commande Q_2 diminue à cet instant (voir figure **III.10**). De même on constate aussi une influence de h_2 sur h_1 car a $t = 2500$ secondes on remarque que le correcteur 2 fait réduire l'effet de la commande Q_1 (voire figure **III.8**)

III.5 Rejet de perturbation

La création des perturbations se fait avec les six vannes à contrôle manuel de la station three tank system, soit par la fermeture de l'une ou deux des vannes de raccordement V_1 , V_2 et V_3 , ou par l'ouverture de l'une ou deux des vannes de fuites V_4 , V_5 et V_6 , ou aussi par la fermeture de la vanne de raccordement et ouvrir une vanne de fuite au même temps.

III.5.1 Fermeture de la vanne V_1 à 50%

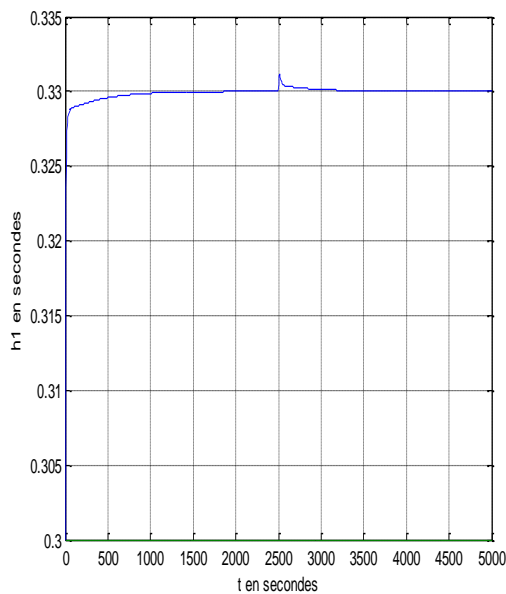


Figure III.11 : l'influence
de la perturbation sur la sortie h_1

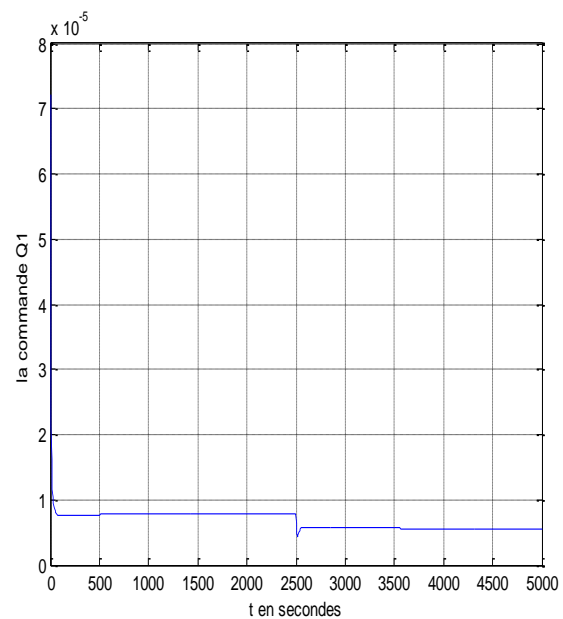


Figure III.12 : l'influence
de la perturbation sur la commande Q_1

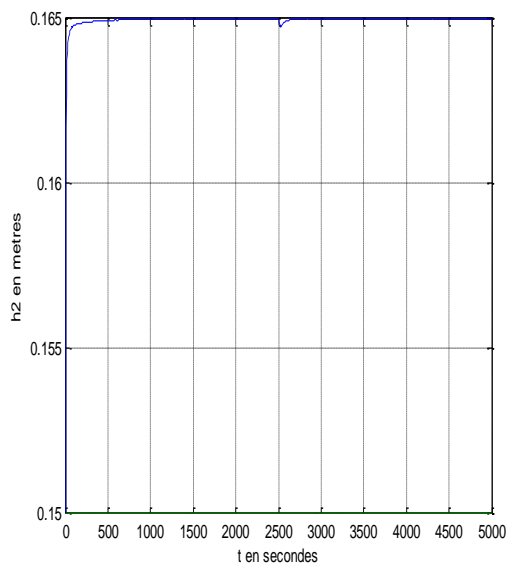


Figure III.13 : l'influence
de la perturbation sur la sortie h_2

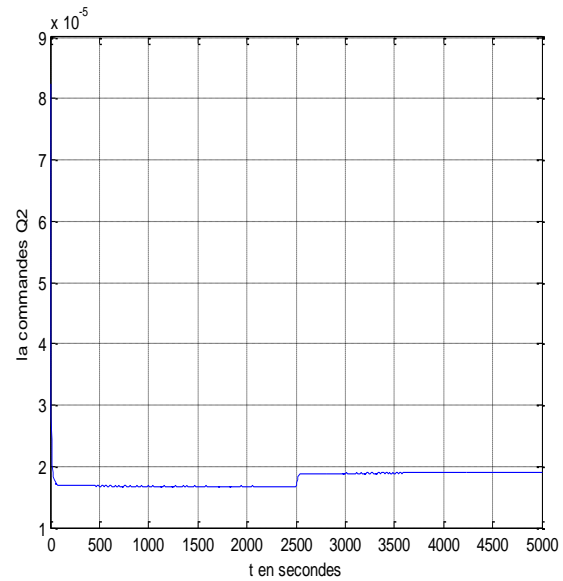


Figure III.14 : l'influence
de la perturbation sur la commande Q_2

III.5.2 Ouverture de la vanne V_4 à 50%

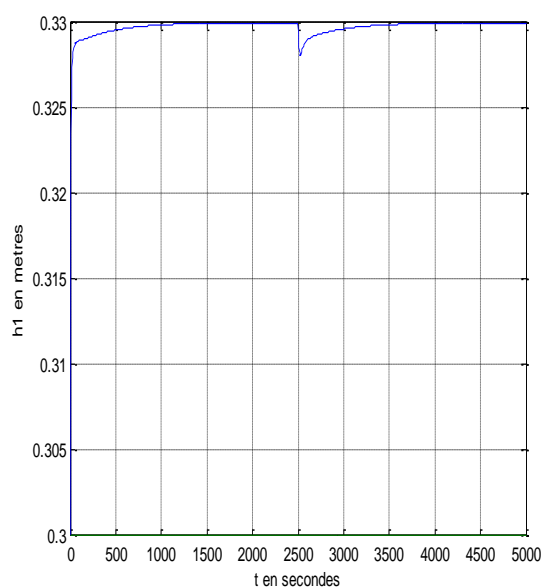


Figure III.15 : l'influence
de la perturbation sur la sortie h_1

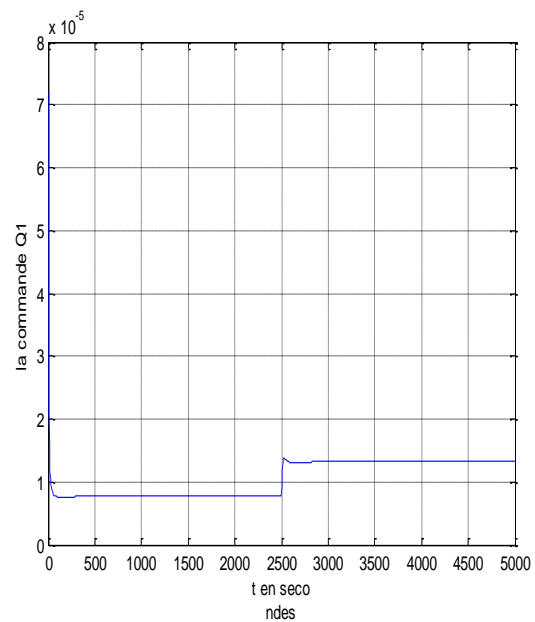


Figure III.16 : l'influence
de la perturbation sur la commande Q_1

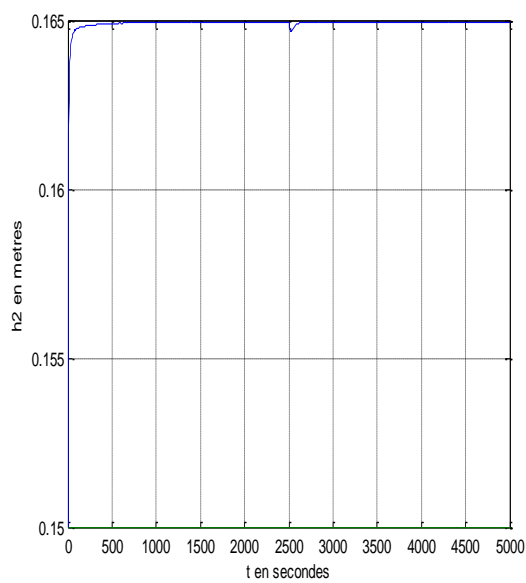


Figure III.17 : l'influence
de la perturbation sur la sortie h_2

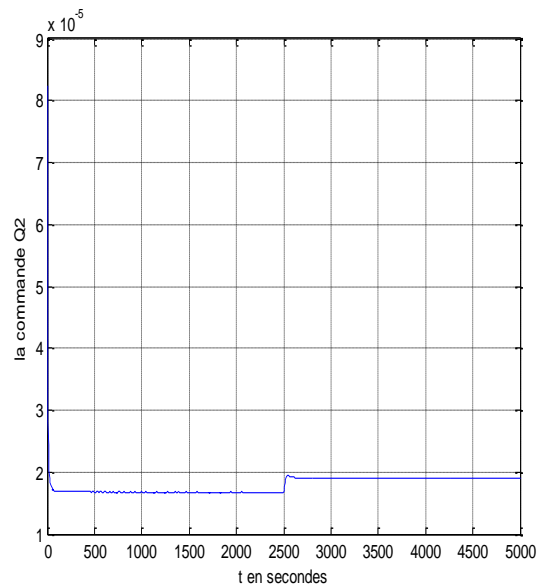


Figure III.18 : l'influence
de la perturbation sur la commande Q_2

III.5.3 Ouverture de la vanne V_6 à 20%

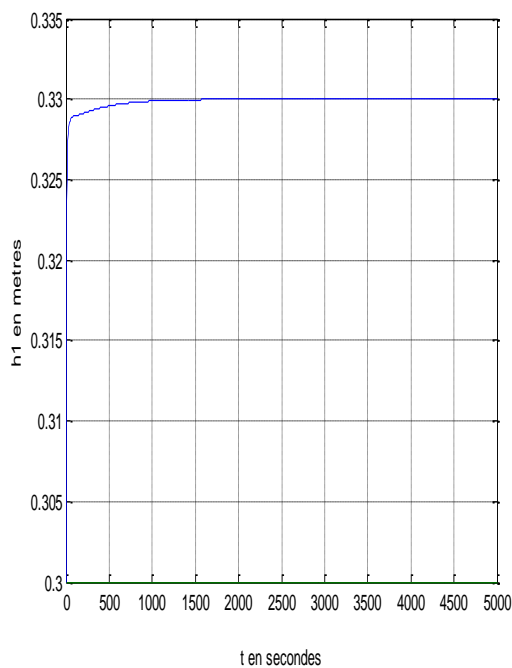


Figure III.19 : l'influence
de la perturbation sur la sortie h_1

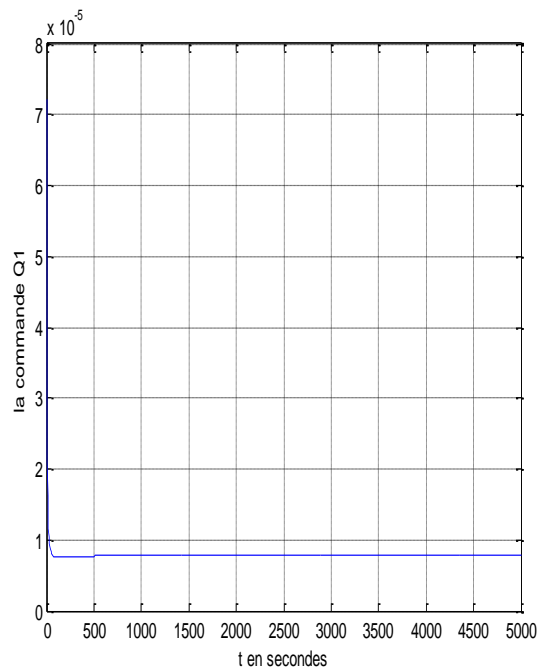


Figure III.20 : l'influence
de la perturbation sur la commande Q_1

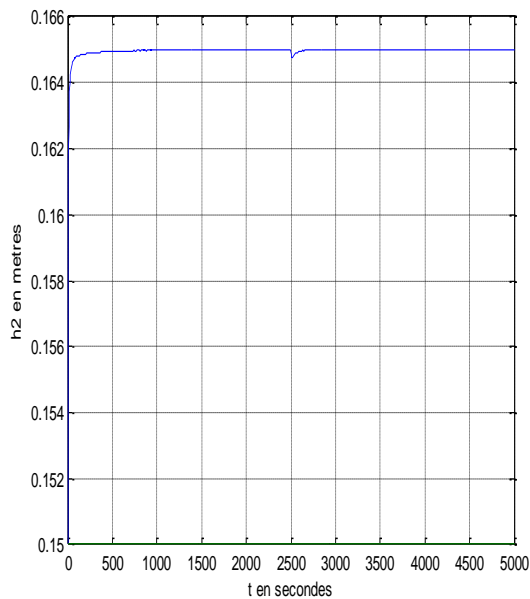


Figure III.21 : l'influence
de la perturbation sur la sortie h_2

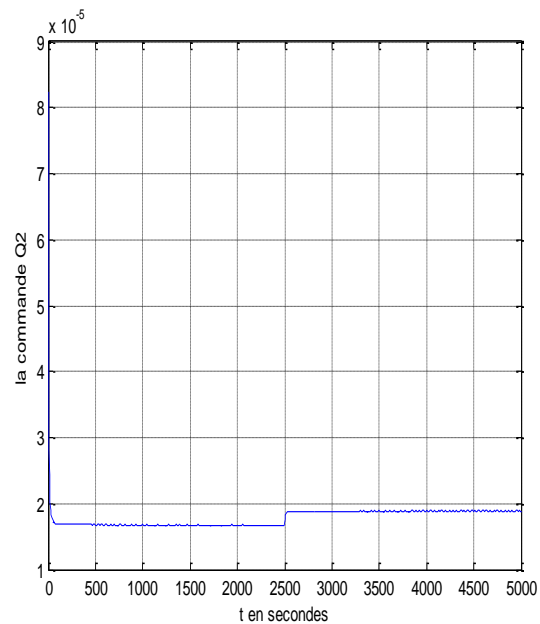


Figure III.22 : l'influence
de la perturbation sur la commande Q_2

La fermeture de la vanne V_1 entraîne une légère influence sur la sortie h_1 le niveau d'eau augmente (voir : figure **III.11**) qui sera corrigé par le correcteur en diminuant la commande Q_1 (voir : figure **III.12**), elle entraîne aussi une légère influence sur la sortie h_2 le niveau d'eau diminué (voir : figure **III.13**) et fera augmenter la commande Q_2 (voir : figure **III.14**).

L'ouverture de la vanne V_4 influe sur la sortie h_1 (voir : figure **III.15**) cette influence sera inhibé par le correcteur en augmentant la commande Q_1 (voir : figure **III.16**) qui influe légèrement sur la sortie h_2 (voir : figure **III.17**) mais elle sera corrigée par le correcteur en augmenter la commande Q_2 (voir : figure **III.18**).

L'ouverture de la vanne V_6 n'a pas d'influence sur la sortie h_1 (voir : figure **III.19**) alors que la commande Q_1 reste inchangée (voir : figure **III.20**) mais son effet est visible seulement sur la sortie h_2 (voir : figure **III.21**) mais le correcteur augmente l'action Q_2 (voir : figure **III.22**) pour la corriger.

III.6 Conclusion

On a présenté dans ce chapitre l'application de la commande par modèle interne pour un système hydraulique non linéaire multivariable. D'après les résultats de simulation obtenus, on a constaté avec le correcteur **IMC** offre de bonnes performances en poursuite de consigne et en rejet de perturbations.

En plus, le correcteur IMC, permet de réduire l'effet des interactions, en diminuant l'effet de changement de chaque consigne, et d'empêche la propagation des perturbations.



Conclusion

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la commande par modèle interne des procédés multivariables, l'objectif est de montrer l'apport de la IMC introduisant une consigne virtuelle calculé à partir de la différence du retour et de la consigne, l'étude est menée en considérant comme procédé physique un système hydraulique à trois réservoirs.

Après un rappel de quelques notions de la théorie des procédés multivariables et des généralités sur la commande par modèle interne, dans le cas monovariable et dans le cas multivariable, nous avons présenté le système hydraulique à trois réservoirs, pour le quel on appliqué la commande IMC.

D'après les résultats de la simulation obtenus, on constate que la commande par modèle interne donne des résultats satisfaisants.

Le travail présenté dans ce mémoire est la commande par modèle interne d'un procédé multivariable, une technique qui assure la stabilité et la robustesse en utilisant un filtre en série avec le correcteur. Les performances obtenues par cette technique peuvent être améliorée en remplaçant ces filtres par des filtres optimaux ou des filtres flous.

Ce régulateur est facile à concevoir, contrairement aux autres régulateurs classiques qui demandent beaucoup de calculs. La synthèse de ce régulateur fournit un régulateur simple pour des systèmes plus complexes pour lesquels un régulateur classique n'existe pas.



Bibliographie

[1]. AIT AMIRAT Tarik.

Etude d'un régulateur par modèle interne.

Mémoire d'ingénieur, UMMTO, promotion 2004.

[2]. SADOUD Hakima, DJOUDI Hakim.

Etude d'un régulateur par modèle interne application de la commande sur la machine asynchrone.

Mémoire d'ingénieur en électrotechnique, UMMTO, promotion 2006.

[3]. JEAN-PIERRE CORRIOU

Commande des procédés, deuxième édition, 2003.

[4]. BENDOU Liazid, TERKI Hakim.

Commande par modèle interne floue d'un système à retard.

Mémoire d'ingénieur en automatique, UMMTO, promotion 2006.

[5]. SADOUD Hassane, DELCI Abderrazak.

Etude comparative entre la régulation à modèle interne et la régulation à approche polynomiale.

Mémoire d'ingénieur en électrotechnique, UMMTO, promotion 2007.

[6]. Internal model control.

Chemical and process engineering.

University of Newcastle upon Tyne.

<http://lorien.ncl.ac.uk/ming/robust/imc.pdf>

[7]. Daniel E. Rivera.

Internal Model Control: A Comprehensive View.

Arizona State University, 1999.

http://www.eq.ufrj.br/links/h2cin/eqe709/AULA_6/RIVERA.pdf

[8]. LITIM Moussa.

Commande à modèle interne synthèse et application.

Thèse magister, département d'électronique université de Batna