

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

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTROTECHNIQUE

OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par :

BENABDALLAH Aanes Eessam Eeddine et

MOHAMEDI Mmohamed Rrachid

Intitulé

Commande tolérante au défaut non linéaire par
linéarisation entrée – sortie d'un système hydraulique
à deux réservoirs

Soutenue le 20-06-2023, devant le jury composé de :

ROUBACHE Toufik
Président

Université Mohamed Boudiaf de M'Sila

BOUGUERRA Abderrahmen
Rapporteur

Université Mohamed Boudiaf de M'Sila

BOUDIA Assam
Examineur

Université Mohamed Boudiaf de M'Sila

Année universitaire : 2022 /2023

Remerciements

Je remercie en premier lieu mon ALLAH de Nous donner la santé et la patience pour avoir Terminer ce travail.

Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à notre encadreur **Pr. BOUGUERRA abderrahmen** pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de me donner ses conseils et remarques.

Ainsi que tous mes enseignants du Département du Génie électrique.

Je veux également remercier ma famille pour leur soutien moral particulièrement mes parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de mes longues années d'études.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours soutenue et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.



Dédicace

Je remercie mes très chers parents, qui ont
toujours
été là pour moi. je remercie ma sœur et mes
frère, pour
leurs encouragements.

Enfin, je remercie mes amis qui ont toujours
été là
pour moi. Leur soutien inconditionnel et
leurs
encouragements ont été d' une grande aide.

BENABDALLAH anes essam eddine

Dédicace

Je dédie cet humble travail :

À tous ceux qui m' ont aidé directement ou indirectement à faire cet humble travail.

Mes très chers parents qui m' ont toujours encouragée, soutenue et aidée pendant toute ma carrière d' étude. Que dieu me les gardes toujours en bonne santé.

À mes sœurs

À mon frère

À toute ma famille

À mes chers amis

MOHAMEDI mohamed rachid

Sommaire

Sommaire.....	I
Liste de figures.....	III
Liste des tableaux.....	V
Abréviations et symboles.....	VI
Introduction générale.....	1
<i>Chapitre 01: Généralités et modélisation d'un système hydraulique à deux réservoirs couplés.</i>	
1.1 Introduction.....	3
1.2 Systèmes hydrauliques.....	3
1.2.1 Energie hydraulique.....	3
1.2.2 Historique.....	3
1.2.3 Applications typiques de l'hydraulique.....	5
1.3 Modélisation du système hydraulique CE105 a reservoirs couples.....	5
1.3.1 Description du matériel de système hydraulique CE105.....	5
1.3.2 Modélisation du système hydraulique CE105.....	7
1.4 Résultat de simulation en boucle ouverte du système CE105.....	11
1.5 Conclusion.....	13
<i>Chapitre 02: Commande non linéaire par linéarisation entrée-sortie.</i>	
2.1 Introduction.....	14
2.2 Historique de la commande.....	14
2.3 Outils mathématiques.....	14
Remarque 2.1.....	17
2.4 Principe de la commande par linéarisation entrée/sortie.....	18
2.4.1 Système a plusieurs entrées et plusieurs sorties.....	18
2.4.2 Loi de commande linéaire.....	20
Remarque 2.2.....	20
2.5 Application au système hydraulique CE105.....	21
2.5.1 Calcul du degré relatif.....	21
2.5.2 Calcule la Difféomorphisme.....	22
2.5.3 Le système en Z.....	22
2.5.4 Calcule la commande U.....	22

2.5.5 Résultats de simulation	23
2.5.6 Commentaires sur les résultats	26
2.6 Commande par régulateur PID	27
2.6.1 Principe	27
2.6.2 Application de la commande PID sur le système CE105	27
2.6.3 Résultat de simulation	28
2.6.4 Commentaires sur ses résultats	32
2.7 Conclusion	32
<i>Chapitre 03: Commande tolérante aux défauts d'un système hydraulique CE105.</i>	
3.1 Introduction.....	33
3.2 Systèmes de commande tolérants aux défauts (FTCS).....	33
3.3 Classification des défauts	34
3.3.1 caractéristiques temporelles.....	34
3.3.2 Les types des défauts.....	35
3.3.3 Classification selon leur représentation	36
3.4 Classification des approches FTC	36
3.4.1 Commande tolérante aux défauts passive (Passive Fault Tolerant Control, PFTC)	37
3.4.2 Commande tolérante aux défauts active	38
3.5 FTC active pour les systèmes non linéaires	40
3.5.1 Méthode basée sur banc de régulateurs	40
3.5.2 Méthode basée sur la commande prédictive	40
3.5.3 Méthode basée sur la commande adaptative	40
3.5.4 Méthode basée sur la logique floue.....	41
3.5.5 Méthode basée sur les réseaux de neurones.....	41
3.6 les résultats de la simulation	41
3.6.1 défaut actionneur	41
3.7 Commentaires sur les résultats.....	54
3.8 Conclusion	54
Conclusion générale.....	55

Liste de figures

Fig 1.1 bateau musical Al-Jazari [6].....	4
Figure 1.2 le fontainier CLAUDE DENIS [8] .	4
Figure 1.3 la machine de Marly [9]. ...	4
Fig 1.4 Présentation du système hydraulique CE105 à deux réservoirs couplés.	6
Fig 1.5 Système hydraulique CE105 à réservoirs couplés.....	7
Fig 1.6 Schéma block du système CE105 en boucle ouvert sur MATLAB.....	12
Fig 1.7 Réponse en boucle ouvert du système CE105.....	13
Fig 2.1 Schéma du principe de linéarisation entrée – sorties.....	17
Fig 2.2 Schéma de principe de la linéarisation entrée/sortie.....	18
Fig 2.3 Synthèse de la loi de commande linéaire.....	20
2.5 Application au système hydraulique CE105	21
Fig 2.4 Schéma block de la commande par linéarisation.....	23
Fig 2.5 Résultats de simulation de la commande linéarisation entrée-sortie. Pour une entrée échelon.	25
Fig 2.6 Résultats de simulation de la commande linéarisation entrée-sortie. Pour une entrée carrée.....	26
Fig 2.7 régulateur PID.....	27
Fig 2.8 Schéma bloc de la commande PID d'un système CE105.....	28
Fig 2.9 Résultats de simulation par PID. Pour une entrée échelon.....	30
Fig 2.10 Résultats de simulation par PID. Pour une entrée carrée.....	31
Fig 3.1 Principe d'un système de commande tolérante aux défauts.....	34
Fig 3.2 Classification des défauts selon leur évolution temporelle.....	35
Fig 3.3 Boucle de régulation et différents défauts agissants.....	35
Fig 3.4 Types des défauts.....	36
Fig 3.5 Classification des commandes tolérantes aux défauts.....	37
Fig 3.6 Schéma de principe d'une loi de commande FTC passive.....	38
Fig 3.7 Schéma de principe d'une loi de commande FTC active.....	39
Fig 3.8 type de défaut actionneur ajouter à la commande u.....	42
Fig 3.9 évolution de défaut actionneur.....	43
Fig 3.10 résultats de simulation de la commande par contrôleur PID,(avec défaut).	44
Fig 3.11 résultats de simulation de la commande par linéarisation entrée/sortie,(avec défaut). Fig 3.12 résultats de simulation de la commande (PID et FLC),(avec défaut)...	46
Fig 3.13 résultats de simulation de la commande par contrôleur PID,(avec défaut).	48

Fig 3.14 résultats de simulation de la commande par linéarisation entrée/sortie,(avec défaut).49

Fig 3.15 résultats de simulation de la commande (PID et FLC),(avec défaut).....50

Fig 3.16 résultats de simulation de la commande par contrôleur PID,(avec défaut).51

Fig 3.17 résultats de simulation de la commande par linéarisation entrée/sortie,(avec défaut).53

Fig 3.18 résultats de simulation de la commande (PID et FLC),(avec défaut).....53

Liste des tableaux

Tab 1.1 Applications typiques de l'hydraulique [10].....	5
Tab 1.2 Paramètres du système hydraulique [13].....	11
Tab 2.1 les paramètres du contrôleur PID.....	28

Abréviations et symboles

Abréviations :

AFTC: Active Fault Tolerant Control.

FDI: Fault Detection and Isolation.

FTC: Fault Tolerant Control.

FTCS: Fault Tolerant Control System.

FLC: Feedback Linearization Controller

Symboles :

A : Section du chaque réservoir

S_n : Section de l'ouverture variable de chaque valve

$a_{12} \quad a_0$: Coefficient de décharge

K_p : Gain de la pompe

g : Constante de gravité

∇ : Le gradient

$L_f h(x)$: Dérivée de Lie

r : Degré relatif total

\emptyset : Difféomorphisme

e : l'erreur de poursuite

v : loi de commande

Z : Le système en Z

u : Variable manipulée (Commande)

Introduction générale

Introduction générale

Dans le domaine industriel, il existe de nombreuses options pour faire fonctionner différentes machines et permettre tout travail à faire, Le système hydraulique est utilisé beaucoup dans le domaine industriel tel que le domaine énergétique avec les centrales, le domaine mécanique avec les vérins ou encore le domaine du stockage avec les réservoirs. Ces domaines sont les plus utilisés et les plus demandés car ils continuent à augmenter et à s'améliorer [1].

Il existe également de nombreuses industries manufacturières telles que l'industrie. Industries pétrochimiques, du papier et du traitement de l'eau Utilisez un système de réservoir de liquide pour contrôler le niveau de liquide, le niveau de liquide doit être Contrôlé par l'unité de contrôle correspondante. Objectifs du contrôle réglementaire est de maintenir le niveau spécifié à une certaine valeur et la capacité d'accepter les nouvelles instructions.

Dans la conception des systèmes de contrôle, le modèle mathématiques est généralement utilisé. Il existe de nombreuses stratégies et méthodes pour réglé et contrôlé le niveau de liquide dans un système à deux réservoirs. Parmi lesquelles on peut citer : la commande par linéarisation entrée/sortie.

Les contrôleurs classiques par rétroaction pour un système non linéaire peuvent entraîner des performances insatisfaisantes ou une instabilité, en cas de dysfonctionnement des actionneurs, des capteurs ou d'autres composants du système, il est donc impératif de concevoir des systèmes de contrôle capables de tolérer les défauts potentielles de ces systèmes afin d'améliorer la fiabilité et la disponibilité tout en offrant les performances souhaitées, ceci est particulièrement important pour la sécurité des systèmes critiques, tels que les avions, les centrales nucléaires, les usines chimiques et le traitement des matières dangereuses [2]. Il convient de noter que le système à tolérance de panne de grande performance comprend deux aspects : le diagnostic de défaut et la commande tolérante aux défauts(CTD) [3].

Les stratégies de contrôle de la tolérance aux pannes visent à maintenir le contrôle sur le comportement dynamique du système de contrôle. Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous introduisons la description et la modélisation du système hydraulique avec deux réservoirs couplés. Nous présentons le modèle d'état et les résultats de simulation en boucle ouverte du système étudié.

Dans le deuxième chapitre, nous introduisons les principes du contrôle de linéarisation des entrées/sorties et du contrôle avec un régulateur PID et leur application sur le modèle d'un système hydraulique à double réservoir. Nous démontrons également la synthèse des lois de

commande par la technique non linéaire par retour d'état E/S, la fin du chapitre, les résultats de simulation seront présentés et commentés.

Le troisième chapitre consacré à la commande tolérante aux défauts avec un défaut d'actionneur. Nous présenterons divers concepts théoriques, définitions et concepts liés à ce domaine, et nous présenterons également les principales méthodes de contrôle de la tolérance aux défauts. Nous comparerons également la commande non linéaire par retour d'état E/S avec le contrôleur PID, à la fin du chapitre, les résultats de simulation seront présentés et commentés.

Chapitre 01

**Généralités et modélisation d'un système hydraulique à
deux réservoirs couplés**

1.1 Introduction

Le comportement électrique et dynamique de tout système peut être étudié, défini par un modèle mathématique, appelé modélisation. L'élaboration d'un modèle (modélisation) implique l'utilisation de lois physiques, de règles de calcul empirique ou de systèmes d'équations différentielles afin de construire un modèle relativement satisfaisant, compte tenu des objectifs poursuivis et des moyens disponibles. Par conséquent, il est clair que cette étape de modélisation est nécessaire pour concevoir un système de contrôle efficace [1].

Dans ce chapitre nous utilisons les équations de Bernoulli et les lois d'équilibre pour créer un modèle mathématique du système hydraulique CE 105. Nous avons ensuite utilisé ce modèle dans SIMULINK/MATLAB pour créer un schéma fonctionnel pouvant être simulé.

1.2 Systèmes hydrauliques

1.2.1 Energie hydraulique

L'origine de mots hydraulique est issue du grec (**HYDRAULIKOS**) ce sont deux mots (**HYDOR**) qui signifie l'eau et (**AULOS**) c'est à dire pipe [4].

Différentes formes d'énergie sont utilisées en hydraulique :

- L'énergie potentielle (par gravité), comme un château d'eau.
- L'énergie cinétique (par vitesse), comme une turbine hydroélectrique.
- L'énergie par pression. C'est cette forme d'énergie qui est utilisée dans les systèmes hydrauliques industriels et mobiles [5].

1.2.2 Historique

Le premier système, créé par **Al-Jazari** au **XIIe** siècle, ce système est une expression d'un automate musical, qui était un bateau avec quatre musiciens automatiques qui flottaient sur un lac pour divertir les invités lors de soirées [6] ; le mécanisme de ce système est composé d'un liquide de trois réservoirs. Après ça le fontainier **CLAUDE DENIS**, c'est une pompe à proximité de l'étang de **CLAGNY** actionnée par un cheval. Créé par **CLAUDE DENIS** dans les années 1639, Ce système a été témoin de nombreux développements. À partir du dix-septième siècle les scientifiques ont essayé d'imaginer une machine pour amener l'eau de la **SEINE** jusqu'à **VERSAILLES**, C'est ce qu'il a confirmé **LE GENTIHOMME AMOLD de VILLE** et **LE CHARPENTIER RENNEQUIN SUALEM** par construire un moulin **BALFOUR**, appelé la machine de **MARLY**, qui date de 1680. Et dans l'année 1817 a été remplacée la machine de **MARLY** par une machine à vapeur conçue par **CECILE** et **MARTN**.

À partir de Le vingtième siècle les ingénieurs créés un système avec une pompe fonctionne avec du fluide [7].



Fig. 1.1 bateau musical Al-Jazari [6].



Fig. 1.2 le fontainier CLAUDE DENIS [8].

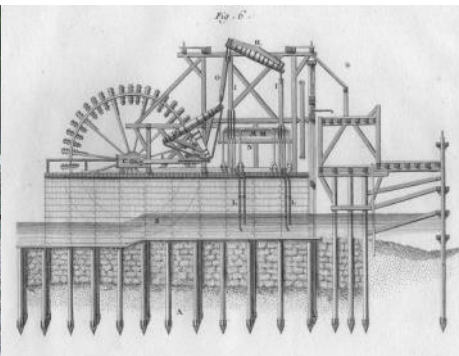


Fig. 1.3 la machine de Marly [9].

1.2.3 Applications typiques de l'hydraulique

Tab. 1.1 Applications typiques de l'hydraulique [10].

Hydraulique industrielle	<ul style="list-style-type: none"> • Machines-outils • Machines de transformation des plastiques • Centrales électriques et nucléaires
Hydraulique mobile	<ul style="list-style-type: none"> • Excavateurs et grues • Machines de construction, agricoles et forestières • Véhicules automobiles, véhicules utilitaires et sur rails
Hydraulique de construction navale	<ul style="list-style-type: none"> • Réglages du gouvernail • Grues de bord • Sabords de charge
Hydraulique offshore	<ul style="list-style-type: none"> • Dameuses hydrauliques • Fraiseuses de sol • Equilibrage maritime
Constructions hydrauliques en acier	<ul style="list-style-type: none"> • Equilibrage maritime • Actionnement de ponts • Plateformes élévatrices de bateaux
Technique spéciale	<ul style="list-style-type: none"> • Techniques robotique et de manipulation • Actionnements d'antennes
Hydraulique dans l'aviation	Dépend des conditions particulières du service aérien (servosoupapes)

1.3 Modélisation du système hydraulique CE105 a réservoirs couplés

1.3.1 Description du matériel de système hydraulique CE105

Le système CE105 à réservoirs couplés est considéré comme un benchmark pour l'étude et l'analyse des problèmes de commande des systèmes hydrauliques. Ce dispositif, est conçu par « TQ Education And Training » et, nous permet d'examiner la commande de niveau du liquide dans un ou deux réservoirs en variant le débit à partir d'une pompe. Cet appareil comporte deux réservoirs verticaux reliés par un canal d'écoulement [11], une valve rotative, utilisée pour changer la section du canal et, par conséquent, pour changer les caractéristiques d'écoulement entre les réservoirs.

Il comporte également des capteurs de niveau, dans chaque réservoir, donnant une tension proportionnelle au niveau du liquide [12]. La vitesse de la pompe peut être ajustée pour remplir le réservoir de gauche au niveau désiré sous contrôle manuel ou automatique et en surveillant le fonctionnement du système. Le réservoir droit peut être rempli à partir du réservoir gauche par l'intermédiaire de l'ouverture variable d'une valve placée au milieu des deux réservoirs. Les trois valves rotatives (A, B, C) de l'appareil permettent de changer les caractéristiques d'écoulement du système. Un canal de débordement est inclus au-dessus de chaque réservoir. La sortie de la pompe est mesurée par un capteur de débit. Le problème à étudier est de maintenir le niveau désiré du liquide dans le deuxième réservoir lors du fonctionnement sous différentes conditions d'entrée/sortie.

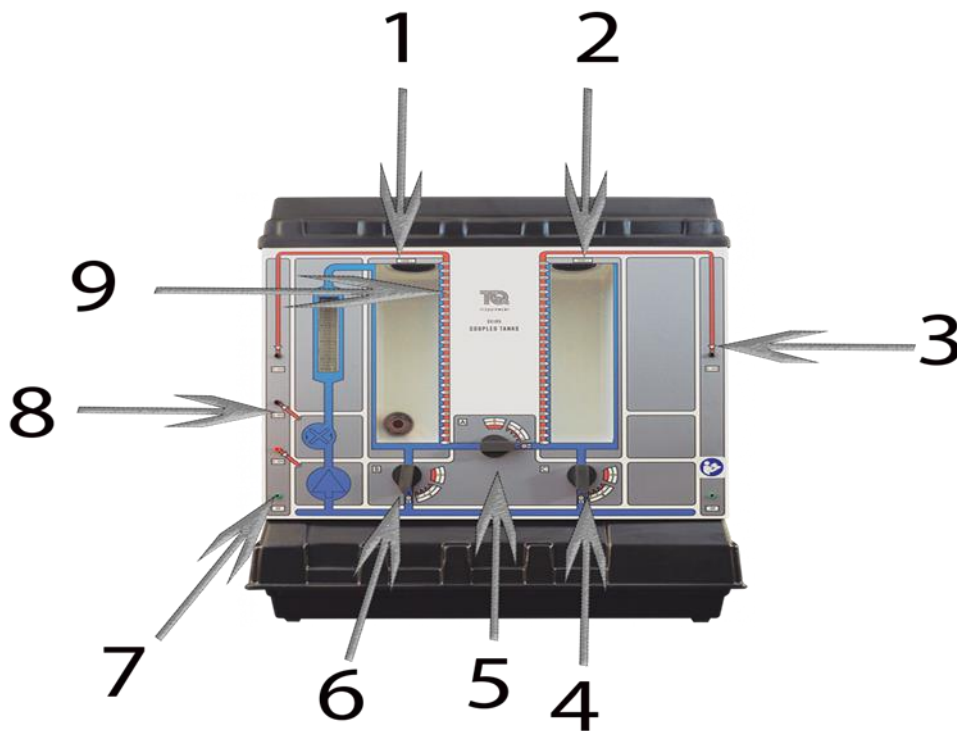


Fig. 1.4 Présentation du système hydraulique CE105 à deux réservoirs couplés.

- | | | |
|----------------|---------------------------|--------------------------------------|
| 1: Réservoir A | 2: Réservoir B | 3: Tension proportionnelle au niveau |
| 4: Valve C | 5: Valve A | 6: Valve B |
| 7: Masse | 8: Tension d'alimentation | 9: Niveau du liquide |

1.3.2 Modélisation du système hydraulique CE105

IL est important de connaître la relation mathématique qui décrit le comportement du système CE105 a réservoirs couplés, surtout pour un automaticien où la modélisation est une phase très importante dans la synthèse de la loi de commande.

Comme il est illustré sur la figure 1.5, le CE105 contient deux réservoirs, et caractérisé par deux états h_1 (le niveau dans le premier réservoir) et h_2 (le niveau dans le deuxième réservoir)[13]. Et trois débits, Q_e c'est le débit d'entrée généré par la pompe, et Q_{12} est le débit entre le premier et le deuxième réservoir ; Q_0 est le débit sortant par la valve C.

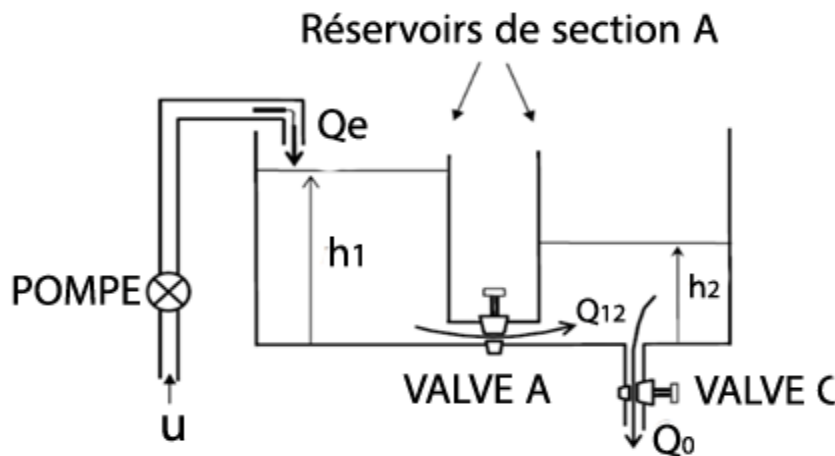


Fig. 1.5 Système hydraulique CE105 à réservoirs couplés.

En utilisant le principe de conservation de masse ou l'équation de continuité, le volume du liquide $V_1 = Ah_1$ dans le premier réservoir est donné par :

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{d(Ah_1)}{dt} = Q_e - Q_{12} \Rightarrow A \frac{dh_1}{dt} = Q_e - Q_{12} \quad (1.1)$$

$$\dot{h}_1 = \frac{1}{A} (Q_e - Q_{12}) \quad (1.2)$$

Pour le deuxième réservoir, le volume du liquide $V_2 = Ah_2$, il est régi par :

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{d(Ah_2)}{dt} = Q_{12} - Q_0 \Rightarrow A \frac{dh_2}{dt} = Q_{12} - Q_0 \quad (1.3)$$

$$\dot{h}_2 = \frac{1}{A} (Q_{12} - Q_0) \quad (1.4)$$

Donc le système peut être représenté par :

$$\begin{cases} \dot{h}_1(t) = \frac{1}{A} (Q_e(t) - Q_{12}(t)) \\ \dot{h}_2(t) = \frac{1}{A} (Q_{12}(t) - Q_0(t)) \end{cases} \quad (1.5)$$

Avec A la section du réservoir, h_1 le niveau du liquide dans le réservoir 1, Q_e le débit d'entrée généré par la pompe et Q_{12} est le débit entre les deux réservoirs au niveau de la valve A qui est donné par :

$$Q_{12} = s_n a_{12} v_A \quad (1.6)$$

Où s_n c'est la section maximale de passage du liquide dans la valve A, a_{12} est le coefficient de décharge de la valve A et v_A la vitesse d'écoulement au niveau de l'orifice de la valve A.

Pour déterminer la vitesse v_A on utilise la relation de Bernoulli qui nous permet d'écrire pour un point situé à la surface du liquide dans le premier réservoir et un point situé à la sortie de la valve A l'équation suivante

$$P_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} + \rho g Z_1 = p_A + \rho \frac{v_A^2}{2} + \rho g Z_A \quad (1.7)$$

Le coefficient ρ c'est la masse volumique de l'eau et g est la constante de gravitation. Etant donné que la section des réservoirs est très grande par rapport à la section de la valve, on peut alors supposer que la vitesse de l'écoulement à la surface du liquide dans les réservoirs est quasiment nulle, ainsi on peut avoir :

$$P_1 + \rho g Z_1 = p_A + \rho \frac{v_A^2}{2} + \rho g Z_A \quad (1.8)$$

Si on considère que $Z_A = 0$ alors $Z_1 = h_1$. De plus, la pression $P_1 = p_{atm}$ (pression atmosphérique) et la pression p_A peut être donnée par :

$$P_A = \rho g h_2 + P_{atm} \quad (1.9)$$

Ainsi, on obtient :

$$P_{atm} + \rho g h_1 = \rho \frac{v_A^2}{2} + \rho g h_2 + P_{atm} \quad (1.10)$$

$$\rho \frac{v_A^2}{2} = \rho g (h_1 - h_2) \quad (1.11)$$

C'est à dire :

$$v_A = \sqrt{2g (h_1 - h_2)} \quad (1.12)$$

Donc, il vient :

$$Q_{12} = s_n a_{12} v_A = s_n a_{12} \sqrt{2g (h_1 - h_2)} \quad (1.13)$$

Le débit de sortie Q_{12} au niveau de la valve C est donné par :

$$Q_0 = s_n a_0 v_C \quad (1.14)$$

Où s_n c'est la section maximale de passage du liquide dans la valve C, a_0 est le coefficient de décharge de la valve C et v_C la vitesse d'écoulement au niveau de l'orifice de la valve A.

Pour déterminer la vitesse v_C on utilise la relation de Bernoulli qui nous permet d'écrire pour un point situé à la surface du liquide dans le deuxième réservoir et un point situé à la sortie de la valve C l'équation suivante :

$$P_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} + \rho g Z_2 = P_C + \rho \frac{v_C^2}{2} + \rho g Z_C \quad (1.15)$$

Le coefficient ρ c'est la masse volumique de l'eau et g est la constante de gravitation. Etant donné que la section des réservoirs est très grande par rapport à la section de la valve, on peut alors supposer que la vitesse de l'écoulement à la surface du liquide dans les réservoirs est quasiment nulle, ainsi on peut avoir :

$$P_1 + \rho g Z_1 = P_A + \rho \frac{v_A^2}{2} + \rho g Z_A \quad (1.16)$$

Si on considère que $Z_C = 0$, alors $Z_2 = h_2$. De plus, la pression $P_2 = P_{atm}$ (pression atmosphérique) et la pression $P_C = P_{atm}$. Ainsi, on obtient :

$$P_{atm} + \rho g h_2 = \rho \frac{v_C^2}{2} + P_{atm} \quad (1.17)$$

$$\rho \frac{v_C^2}{2} = \rho g h_2 \quad (1.18)$$

C'est à dire :

$$v_C = \sqrt{2gh_2} \quad (1.19)$$

Il vient alors :

$$Q_0 = s_n a_0 \sqrt{2gh_2} \quad (1.20)$$

En résumé, on obtient :

$$\begin{cases} Q_{12} = s_n a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_1)} \\ Q_0 = s_n a_0 \sqrt{2gh_2} \end{cases} \quad (1.21)$$

Avec :

Q_{12} : Le débit entre les deux réservoirs

Q_0 : Le débit de sortie.

S_n : La section maximale des valves A et C. Dans la pratique, cette section est donnée par les dimensions de la valve et du canal d'écoulement.

a_{12} et a_0 : représentent les coefficients de décharge des valves A et C.

g : La constante de gravité, avec $g = 9.80 \text{ m/s}^2$

Alors, le système hydraulique est régi par l'équation différentielle non linéaire suivante :

$$\begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{A} (Q_e - s_n a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)}) \\ \frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A} (s_n a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} - s_n a_0 \sqrt{2gh_2}) \end{cases} \quad (1.22)$$

La vitesse de la pompe peut être ajustée pour remplir le premier réservoir, la relation entre la tension d'alimentation de la pompe u et le débit d'entrée Q_e peut s'écrire comme suit :

$$Q_e = K_p u \quad (1.23)$$

La relation entre le niveau h_2 , et la tension de sortie y indiquée par le capteur de niveau est donnée par :

$$y = K_h h_2 \quad (1.24)$$

Finalement, le système hydraulique est régi par l'équation différentielle non linéaire suivante :

$$\begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{A} (K_p u - s_n a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)}) \\ \frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A} (s_n a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} - s_n a_0 \sqrt{2gh_2}) \end{cases} \quad (1.26)$$

Pour ce système, nous définissons le modèle d'état avec : $[x_1, x_2]^T = [h_2, h_1]^T$, tel que

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x) \\ \dot{x}_2 = f_2(x) + K_u u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1.27)$$

On a :

$$x_1 = h_2 \Rightarrow \dot{x}_1 = \dot{h}_2 = \frac{1}{A} (s_n a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} - s_n a_0 \sqrt{2gh_2}) \quad (1.28)$$

$$x_2 = h_1 \Rightarrow \dot{x}_2 = \dot{h}_1 = \frac{1}{A} (-s_n a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} + K_p u) \quad (1.29)$$

Donc :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{A} (s_n a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} - s_n a_0 \sqrt{2gh_2}) \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{A} (-s_n a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} + K_p u) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1.30)$$

On obtient :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{s_n a_{12} \sqrt{2g}}{A} \sqrt{x_2 - x_1} - \frac{s_n a_0 \sqrt{2g}}{A} \sqrt{x_1} \\ \dot{x}_2 = -\frac{s_n a_{12} \sqrt{2g}}{A} \sqrt{x_2 - x_1} + \frac{K_p}{A} u \end{cases} \quad (1.31)$$

En posant : $\beta_1 = \frac{s_n a_{12} \sqrt{2g}}{A}$; $\beta_2 = \frac{s_n a_0 \sqrt{2g}}{A}$; $K_u = \frac{K_p}{A}$

Le modèle dynamique peut s'écrire alors sous la forme compacte suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \beta_1 \sqrt{x_2 - x_1} - \beta_2 \sqrt{x_1} \\ \dot{x}_2 = -\beta_1 \sqrt{x_2 - x_1} + K_u u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1.32)$$

Les paramètres du système sont donnés par le Tableau 1.2

Tab 1.2 Paramètres du système hydraulique [13].

Section du chaque réservoir	A	9350 10 ⁻⁶ m ²
Section de l'ouverture variable de chaque valve	S _n	78.5 10 ⁻⁶ m ⁻⁶
Coefficient de décharge	a ₁₂	1
	a ₀	0.5
Tension d'entrée maximale	u _{max}	10 v
Gain de la pompe	K _p	7.5 10 ⁻⁶ m ³ / sV
Constante de gravité	g	9.8 m / s ²

1.4 Résultat de simulation en boucle ouverte du système CE105

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation en boucle ouverte du système hydraulique CE105. Ces résultats ont été obtenus en représentant le modèle dynamique non linéaire du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés dans Simulink/Matlab (Figure 1.6) avec les paramètres de simulation suivants :

- Pas de simulation : $T_s = 0,1 \text{ s}$
- Horizon de simulation : $T = 700 \text{ s}$
- Tension d'entrée : $U = 10 \text{ V}$
- Coefficient de décharge de la valve A : $a_{12} = 1$
- On prend plusieurs valeurs pour le coefficient de décharge de la valve C :

$K_h = a_{12} = 1$, $K_u = 0.04$, $b_1 = 0.03$, $b_2 = 0.02$

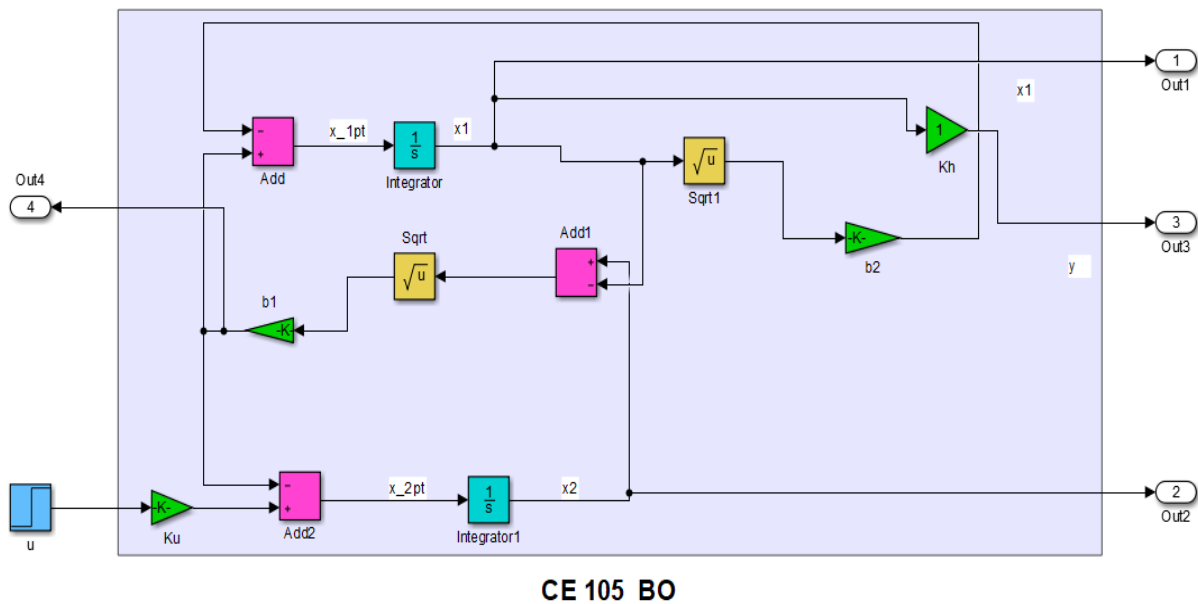


Fig. 1.6 Schéma block du système CE105 en boucle ouvert sur MATLAB.

La réponse en boucle ouvert du système CE105 est donnée par la figure 1.7 :

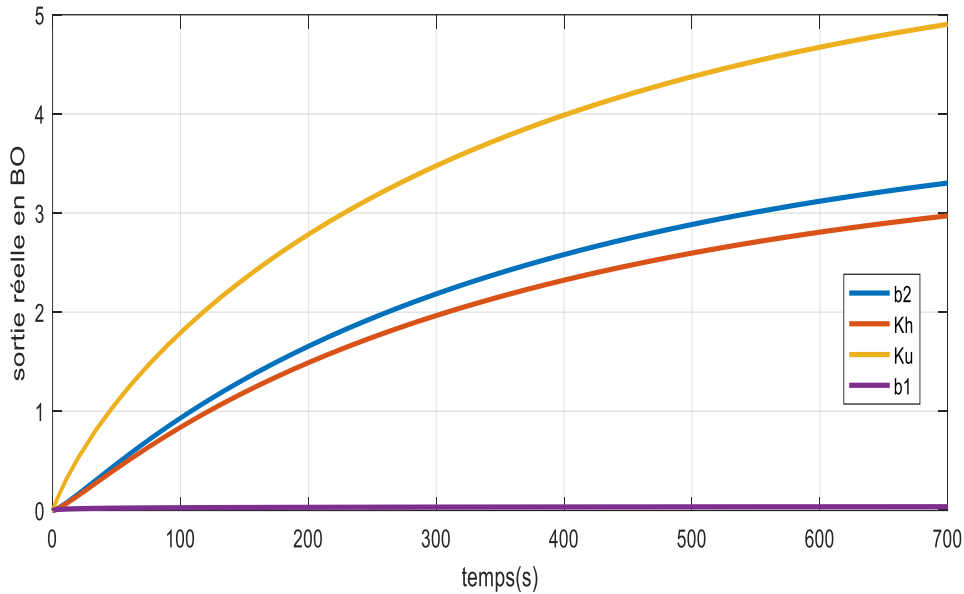


Fig. 1.7 Réponse en boucle ouvert du système CE105.

La Figure 1.7 montre le résultat obtenu et on remarque que la réponse obtenue du modèle non linéaire du système hydraulique diffère d'une valeur de (K_h , K_u , b_1 et b_2) à une autre. Donc la variation de ce paramètre modifie le comportement dynamique du système hydraulique.

1.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la description du système hydraulique CE105 et sa modélisation dynamique et d'état. Le système hydraulique se compose de deux réservoirs couplés et son modèle dynamique est un modèle non linéaire. Un test de simulation en boucle ouverte est présenté pour illustrer le comportement du système par rapport aux variations du coefficient de décharge de la vanne de sortie.

Chapitre 02

**Commande non linéaire par linéarisation entrée-
sortie**

2.1 Introduction

La linéarisation entrée-sortie est une approche géométrique de la conception de la commande non linéaire qui a fait l'objet de beaucoup de recherches dans les années 80. L'idée centrale de l'approche est de transformer la dynamique non linéaire d'un système en une dynamique (entièrement ou en partiellement) linéaire, de telle sorte que des techniques de commande linéaire puissent être appliquées [14].

La linéarisation de la rétroaction d'état (linéarisation en boucle) est une méthode de contrôle non linéaire qui intéresse les chercheurs ces derniers temps. Le concept fondamental de cette approche est la manipulation algébrique de la dynamique du système complètement ou partiellement non linéaire, et sa conversion en une forme linéaire [14]. Dans ce chapitre, nous discutons de la méthode de contrôle de la linéarisation dans le sens entrée-sortie et nous appliquons au modèle du système hydraulique à deux réservoirs.

2.2 Historique de la commande

La commande par linéarisation entrée-sortie est une méthode de commande avancée qui permet de contrôler des systèmes non linéaires en utilisant des techniques de commande linéaire. Cette méthode a été développée dans les années 1980 et 1990 par les chercheurs en commande automatique. Cette dernière a enrichi le cadre de la théorie des systèmes avec des concepts physiques fondamentaux. Par ailleurs, les travaux de Yula et al ont établi à première connexion entre la théorie des circuits et la théorie de stabilité E/S [15].

2.3 Outils mathématiques

Dans cette section, nous présentons quelques outils mathématiques nécessaires pour assimiler la technique de linéarisation entrée-sortie.

■ Gradient

On définit une fonction scalaire $h(x)$ par rapport au vecteur d'état $x \in R^n$, le gradient de $h(x)$ est donné par :

$$\nabla h = \frac{\partial h}{\partial x} = \left[\frac{\partial h}{\partial x} \quad \dots \quad \frac{\partial h}{\partial x_n} \right] \quad 2.1$$

∇h est un vecteur ligne d'éléments : $\nabla h_i = \frac{\partial h}{\partial x_i}$

■ Dérivée de Lie

On considère une fonction scalaire $h: R^n \rightarrow R$ et deux champs de vecteurs $f, g: R^n \rightarrow R^n$. La dérivée de Lie comme étant une nouvelle fonction scalaire, notée $L_f h$, donnant la dérivée de $h(x)$ dans la direction de $f(x)$, tel que :

$$L_f h(x) = \nabla h f = \left[\frac{\partial h}{\partial x_1} \quad \dots \quad \frac{\partial h}{\partial x_n} \right] \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_2 \end{bmatrix} \quad 2.2$$

Les dérivées de Lie d'ordre quelconque sont données par :

$$L_f^0 h = h(x) \quad 2.3$$

$$L_f^i h = L_f(L_f^{i-1} h); i = 1, 2, 3, \dots \quad 2.4$$

La dérivée de Lie de la fonction $L_f h$ suivant le champ de vecteur g est donnée par :

$$L_g L_f h = \nabla(L_f h)g = \sum_{i=1}^n \frac{\partial(L_f h(x))}{\partial x_i} g_i(x) \quad 2.5$$

■ Degrés relatif

Le degré relatif (noté r) d'un système SISO peut être intuitivement défini comme le nombre minimum de fois requis pour différencier l'expression de la sortie (y) par rapport au temps pour voir que l'entrée se produit clairement (u).

$$L_g L_f^i h(x) = 0 \quad 0 \leq i \leq -1 \quad 2.6$$

$$L_g L_f^{r-1} h(x) \neq 0 \quad 2.7$$

$$\begin{cases} y(x) = h(x) \\ y^{(1)} = h_1(x) \\ y^{(2)} = h_2(x) \\ \vdots \\ y^{(r-1)}(x) = h_{r-1}(x) \\ y^{(r)}(x) = a(x) + b(x)u \end{cases} \quad 2.8$$

Afin de déterminer la loi de commande non linéaire nous calculons le degré relatif de la sortie i.e. le nombre de fois qu'il faut dériver la sortie afin de faire apparaître l'entrée u .

La dérivation temporelle de la sortie y donne :

$$\dot{y} = \frac{dh(x)}{dx} \frac{dx}{\partial t} \quad 2.9$$

$$\begin{aligned} &= \frac{dh(x)}{dx} (f(x) + g(x)u) \\ &= L_f h(x) + L_g h(x)u \end{aligned} \quad 2.10$$

Si $L_g h(x) \neq 0 \forall x \in R^n$, on montre aisément que la commande :

$$u = \frac{1}{L_g h(x)} (-L_f h(x) + v) \quad 2.11$$

Conduit au système linéaire représentant un simple intégrateur :

$$\dot{y} = v \quad 2.12$$

Si $L_g h(x) = 0$, on continue la dérivation pour obtenir :

$$y^{(i)} = L_f^i h(x) + L_g L_f^{i-1} h(x)u \quad i = 1, 2, \dots \quad 2.13$$

Avec $L_g L_f^{i-1} h(x) \neq 0$. La méthode consiste donc à déterminer le degré de dérivation r à partir duquel le coefficient multiplicateur de la commande $u \left(L_g L_f^{i-1} h(x) \right)$ n'est pas nul, r est le degré relatif de h . On montre que pour :

$$y^{(r)} = L_f^r h(x) + L_g L_f^{r-1} h(x)u \quad 2.14$$

La commande :

$$u = \frac{1}{L_g L_f^{r-1} h(x)} (-L_f^r h(x) + v) \quad 2.15$$

Conduit au système linéaire équivalent à une chaîne de r intégrateurs :

$$y^{(r)} = v \quad 2.16$$

Si le degré relatif est supérieur à 1, on a : $L_g h(x) = 0$. Donc : $\dot{y} = L_f h(x)$

Et on montre que :

$$y^{(i)} = L_f^i h(x) \quad 0 \leq i \leq r \quad 2.17$$

$$y^{(r)} = L_f^r h(x) + L_g L_f^{r-1} h(x) \quad 2.18$$

Le gain K est tel que la matrice des paramètres $A_s = A - BK$ est une matrice stable.

$$v = -kz = -k_1z_1 - k_2z_2 \dots - k_rz_r \quad 2.19$$

Remarque 2.1

Le degré relatif (r_i) lié la sortie y_i représente le nombre de fois qu'il faut dériver cette sortie pour faire apparaître explicitement au moins une des entrées $u_i (1 \leq i \leq m)$ [16]. Pour un système commandable, on a toujours. Si l'entrée n'apparaît pas après n dérivations de la sortie, le système est non commandable. Pour $r = n$, le système admet une linéarisation exacte. Pour $r < n$, le système admet une linéarisation partielle. L'ordre du sous-système linéarité est égal à r .

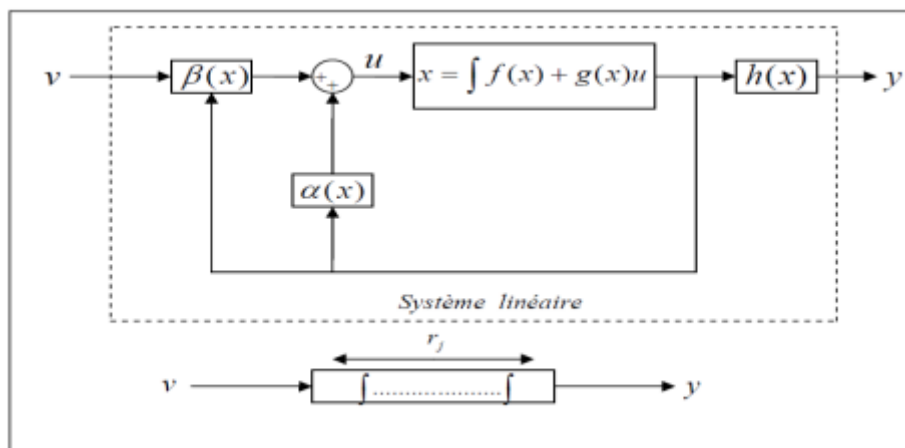


Fig. 2.1 Schéma du principe de linéarisation entrée – sorties.

■ Difféomorphisme

La fonction dérivable $\phi: \Omega \rightarrow \mathcal{R}^n$ définie dans une région $\Omega \subset \mathcal{R}^n$ est appelée difféomorphisme si elle vérifie les deux conditions suivantes :

ϕ est inversible, c'est-à-dire, il existe une fonction ϕ^{-1} telle que : $\phi^{-1}(\phi(x)) = x$ pour tout $x \in \Omega \subset \mathcal{R}^n$.

ϕ^{-1} et ϕ sont des fonctions dérivables.

Le difféomorphisme est utilisé pour transformer un système non-linéaire en un autre système non-linéaire en effectuant un changement de variables de la forme.

2.4 Principe de la commande par linéarisation entrée/sortie

La linéarisation entrée-sortie est le processus de linéarisation de la relation dynamique entre l'entrée de commande du système et sa sortie en utilisant une loi de commande non linéaire. Cette dernière est appelée linéarisation. Une autre loi de commande linéaire est ensuite utilisée pour stabiliser le système linéaire ainsi obtenu. La figure 2.2 illustre bien cette méthode. D'autre part, la linéarisation entrée-sortie donne des modèles linéaires valables sur tout l'espace d'état. Un compensateur linéaire qui stabilise le système est alors en principe plus efficace. Du fait de sa simplicité, le cas d'un système à une entrée et une sortie est présenté en premier [15].

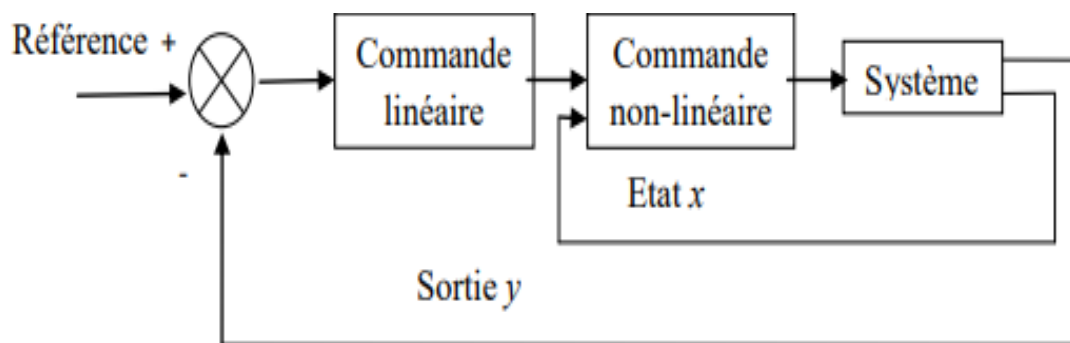


Fig. 2.2 Schéma de principe de la linéarisation entrée/sortie.

2.4.1 Système à plusieurs entrées et plusieurs sorties

Avant tout, on considère que le système non-linéaire de p entrées et p sorties :

$$\dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^p g_i(x) \cdot u_i \quad 2.20$$

$$y_i = h_i \quad i = 1, 2, \dots, p \quad 2.21$$

Ou :

$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T \in \mathcal{R}^n$ est le vecteur des états.

$u = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_n]^T \in \mathcal{R}^n$ le vecteur des commandes.

$y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_q]^T \in \mathcal{R}^p$ représente le vecteur des sorties.

f, g_i sont des champs de vecteurs.

Le problème consiste à trouver une relation linéaire entre l'entrée et la sortie en dérivant la sortie jusqu'à ce qu'au moins une entrée apparaisse en utilisant l'expression:

$$y_j^{r_j} = L_f^{r_j} h_j(x) + \sum_{i=1}^p L_{g_i} \left(L_f^{r_j} h_j(x) \right) \cdot u_i, \quad j = 1, 2, \dots, p \quad 2.22$$

Où :

$L_f^j h_j$ et $L_g^j h_j$ sont les $i^{\text{ème}}$ dérivées de Lie de h_j respectivement dans la direction de f et g . r_j est le nombre de dérivées nécessaires pour qu'au moins, une des entrées apparaisse dans l'expression (2.22) et il est connu sous le nom du degré relatif correspondant à la sortie y_j .

Le degré relatif total (r) est défini comme étant la somme de tous les degrés relatifs obtenus à l'aide de (2.22) et doit être inférieur ou égal à l'ordre du système :

$$r = \sum_{j=1}^p r_j \leq n \quad 2.23$$

On dit que le système (2.20) a pour degré relatif (r) s'il vérifie :

$$L_g L_f^k h_j = 0 \quad 0 < k < r_j - 1, 1 \leq j \leq p, 1 \leq i \leq p \quad 2.24$$

Dans le cas où le degré relatif total est égal à l'ordre du système, on est en présence d'une linéarisation au sens des entrées-états. Si par contre le degré relatif total est strictement inférieur à l'ordre du système, la linéarisation est dite linéarisation au sens des entrées- sorties.

Pour trouver l'expression de la loi linéarisante u qui permet de rendre la relation linéaire entre l'entrée et la sortie, on récrit l'expression (2.22) sous forme matricielle:

$$[y_1^{r_1} \dots y_p^{r_p}]^T = \xi(x) + D(x) \cdot u \quad 2.25$$

$$\xi(x) = \begin{bmatrix} L_f^{r_1} h_1(x) \\ \dots \\ L_f^{r_p} h_p(x) \end{bmatrix} \quad 2.26$$

$$D(x) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1(x) & L_{g_2} L_f^{r_1-1} h_1(x) & L_{g_p} L_f^{r_1-1} h_1(x) \\ L_{g_1} L_f^{r_2-1} h_2(x) & L_{g_2} L_f^{r_2-1} h_2(x) & L_{g_p} L_f^{r_2-1} h_2(x) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{g_1} L_f^{r_p-1} h_p(x) & L_{g_2} L_f^{r_p-1} h_p(x) & L_{g_p} L_f^{r_p-1} h_p(x) \end{bmatrix} \quad 2.27$$

Où $D(x)$ est appelé matrice de découplage du système. Si on suppose que n'est pas singulier, la loi de commande linéarisante a pour forme :

$$u = D(x) \cdot (-\xi(x) + v) \quad 2.28$$

2.4.2 Loi de commande linéaire

La nouvelle entrée de commande v est obtenue en utilisant un réglage linéaire (retour d'état, régulateur classique, etc.) présentée selon la Figure 2.3. En général, l'objectif de la commande est de forcer la sortie du système à suivre une trajectoire désirée. Si on considère y_d comme la sortie désirée (référence), l'erreur de poursuite e est donnée par :

$$e = y_d - y \quad 2.29$$

Donc la loi de commande est donnée par [17].

$$v = y_d^r + k_{r-1}e^{(r-1)} + \dots + k_1\dot{e} + k_0e \quad 2.30$$

$$v = y_d^r + k_{r-1}(y_d^{(r-1)} - y^{(r-1)}) + \dots + k_0(y_d^r - y) \quad 2.31$$

Le choix des paramètres k_i est basé sur l'imposition des pôles du polynôme caractéristique :

$$e^r + k_{r-1}s^{r-1} + \dots + k_1s + k_0 \quad 2.32$$

C'est-à-dire, que tous les pôles imposés soient situés strictement dans la partie gauche du plan de Laplace.

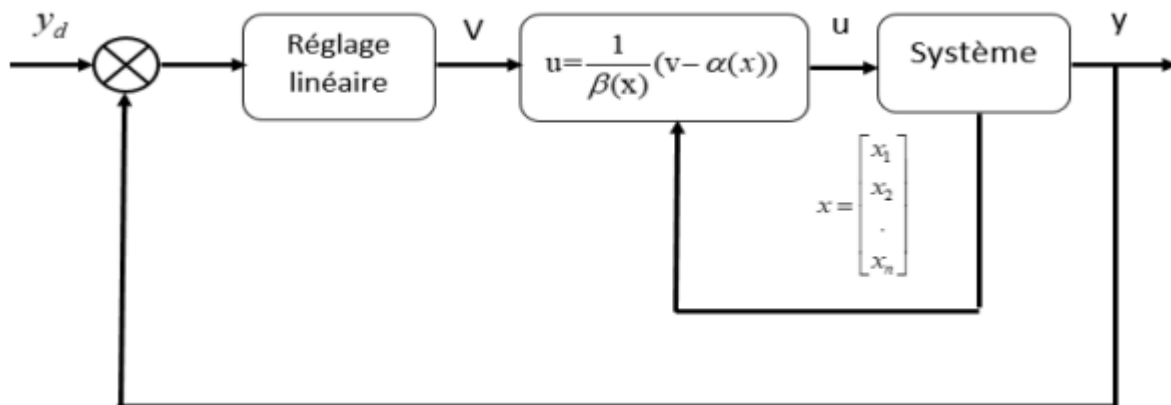


Fig. 2.3 Synthèse de la loi de commande linéaire.

Remarque 2.2

Dans ce travail, le degré relatif r est supposé égal à l'ordre n du système. Autrement dit, la dynamique du système est complètement linéarisée et le système n'a pas de dynamique interne (dynamique du point zéro).

2.5 Application au système hydraulique CE105

Les équations d'état du CE105 à réservoirs couplés :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{A}(-S_n \cdot a_{12} \sqrt{2 \cdot g \cdot (x_2 - x_1)} - S_n \cdot a_0 \sqrt{2g \cdot x_1}) \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{A}(-S_n \cdot a_{12} \sqrt{2 \cdot g \cdot (x_2 - x_1)} + K_Q \cdot u) \\ y = x_1 \end{cases} \quad 2.33$$

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x) \\ y = h(x) \end{cases} \quad 2.34$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{A}(-S_n \cdot a_{12} \sqrt{2 \cdot g \cdot (x_2 - x_1)} - S_n \cdot a_0 \sqrt{2g \cdot x_1}) - \beta_1 \sqrt{(x_2 - x_1)} \\ \frac{1}{A}(-S_n \cdot a_{12} \sqrt{2 \cdot g \cdot (x_2 - x_1)}) \end{bmatrix} \quad 2.35$$

$$\beta_1 = \frac{S_n \cdot a_{12} \sqrt{2g}}{A}, \quad \beta_2 = \frac{S_n \cdot a_0 \sqrt{2g}}{A}, \quad k_u = \frac{K_Q}{A} \quad 2.36$$

$$\beta_1 = 0.0334, \quad \beta_2 = 0.0186, \quad k_u = 8.02 \times 10^{-4}$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} \beta_1 \sqrt{(x_2 - x_1)} - \beta_2 \sqrt{x_1} \\ -\beta_1 \sqrt{(x_2 - x_1)} \end{bmatrix} \quad 2.37$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad 2.38$$

2.5.1 Calcul du degré relatif

La condition de linéarisation pour tester si le système non linéaire permet la linéarisation entrée-sortie est l'ordre du degré relatif du système. Le degré relatif r_i associé à chaque quantité de sortie y_i sélectionnée est calculé, ce qui correspond au nombre de fois que la sortie doit être dérivée pour que l'une des quantités contrôlées se produise sans ambiguïté. Dans notre cas, l'ordre apparaît d'abord dans la dérivée seconde.

$$y = x_1 \quad 2.39$$

$$y = h(x) = x_1 \quad 2.40$$

$$y^{(1)} = h_1(x) = L_f h(x) = \dot{x}_1 = \beta_1 \sqrt{(x_2 - x_1)} - \beta_2 \sqrt{x_1} \quad 2.41$$

$$y^{(1)} = \beta_1 (x_2 - x_1)^{0.5} - \beta_2 (x_1)^{0.5} \quad 2.42$$

$$y^{(2)} = h_2(x) = L_f^2 h(x) = 0.5\beta_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)(x_2 - x_1)^{-0.5} - 0.5\beta_2(\dot{x}_1)(x_1)^{-0.5} \quad 2.43$$

$$y^{(2)} = h_2(x) = L_f^2 h(x) = (0.5\beta_1[(-\beta_1(x_2 - x_1)^{0.5} + k_u \cdot u - \beta_1(x_2 - x_1)^{0.5} - \beta_2(x_1)^{0.5})(x_2 - x_1)^{-0.5}] - 0.5\beta_2(\beta_1(x_2 - x_1)^{0.5} - \beta_2(x_1)^{0.5})(x_1)^{-0.5}) \quad 2.44$$

Ainsi, l'entrée u apparait dans l'expression (2.44). On note, pour cette sortie, un degré relatif.

$r=2$.

2.5.2 Calcule la Difféomorphisme

Le difféomorphisme est utilisé pour transformer un système non linéaire en un autre système non linéaire en effectuant un changement de variables de la forme.

$$z_1 = \phi_1(x) = h(x) = x_1 \quad 2.45$$

$$z_2 = \phi_2(x) = L_f h(x) = \dot{x}_1 = \beta_1(x_2 - x_1)^{0.5} - \beta_2(x_1)^{0.5} \quad 2.46$$

$$z_3 = \phi_3(x) = L_f^2 h(x) = (0.5\beta_1[(-\beta_1(x_2 - x_1)^{0.5} + k_u \cdot u - \beta_1(x_2 - x_1)^{0.5} - \beta_2(x_1)^{0.5})(x_2 - x_1)^{-0.5}] - 0.5\beta_2(\beta_1(x_2 - x_1)^{0.5} - \beta_2(x_1)^{0.5})(x_1)^{-0.5}) \quad 2.47$$

2.5.3 Le système en Z

$$\dot{Z}_1 = Z_2 = \dot{x}_1 \quad 2.48$$

$$\dot{Z}_2 = Z_3 = (0.5\beta_1[(-\beta_1(x_2 - x_1)^{0.5} + k_u \cdot u - \beta_1(x_2 - x_1)^{0.5} - \beta_2(x_1)^{0.5})(x_2 - x_1)^{-0.5}] - 0.5\beta_2(\beta_1(x_2 - x_1)^{0.5} - \beta_2(x_1)^{0.5})(x_1)^{-0.5}) = v \quad 2.49$$

2.5.4 Calcule la commande U

$$\dot{Z}_2 = (0.5\beta_1[(-\beta_1(x_2 - x_1)^{0.5} + k_u \cdot u - \beta_1(x_2 - x_1)^{0.5} - \beta_2(x_1)^{0.5})(x_2 - x_1)^{-0.5}] - 0.5\beta_2(\beta_1(x_2 - x_1)^{0.5} - \beta_2(x_1)^{0.5})(x_1)^{-0.5}) = v \quad 2.50$$

$$U = \frac{(v + \beta_1^2 - 0.5\beta_1 k_u \beta_2 (x_2 - x_1)^{-0.5} - 0.5\beta_2^2 + 0.5\beta_2 \beta_1 x_1^{-0.5} (x_2 - x_1)^{0.5})}{0.5 k_u \beta_1 (x_2 - x_1)^{-0.5}} \quad 2.51$$

$$v = -K_1 \cdot Z_1 - K_2 \cdot Z_2 \quad 2.52$$

2.5.5 Résultats de simulation

Ces résultats ont été obtenus en utilisant le modèle mathématique du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés avec l'application des lois de commande par linéarisation entrée/sortie, sont illustrés par les figure 2.4.

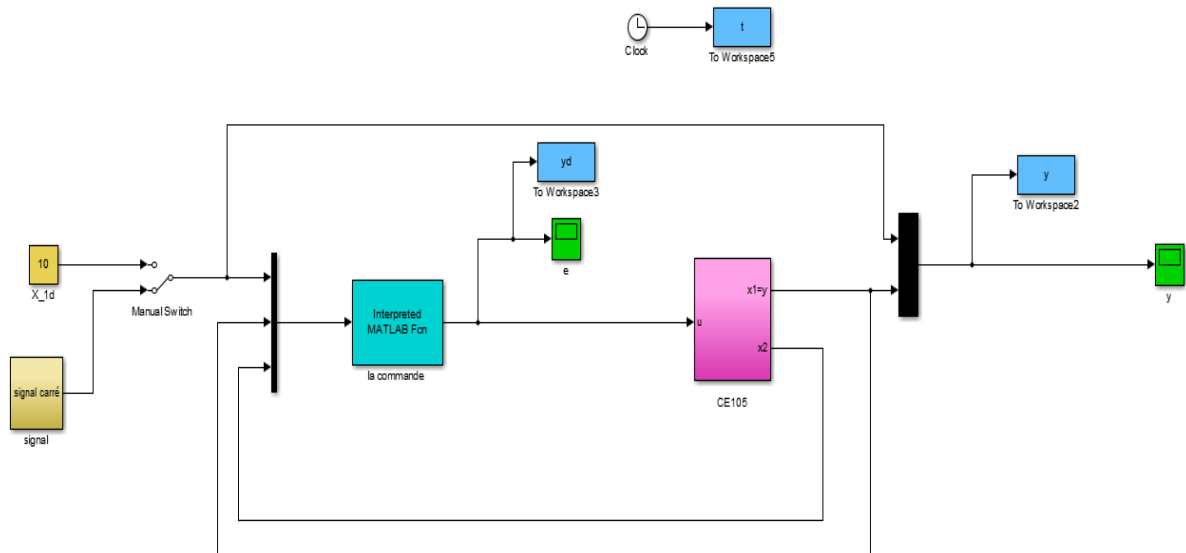
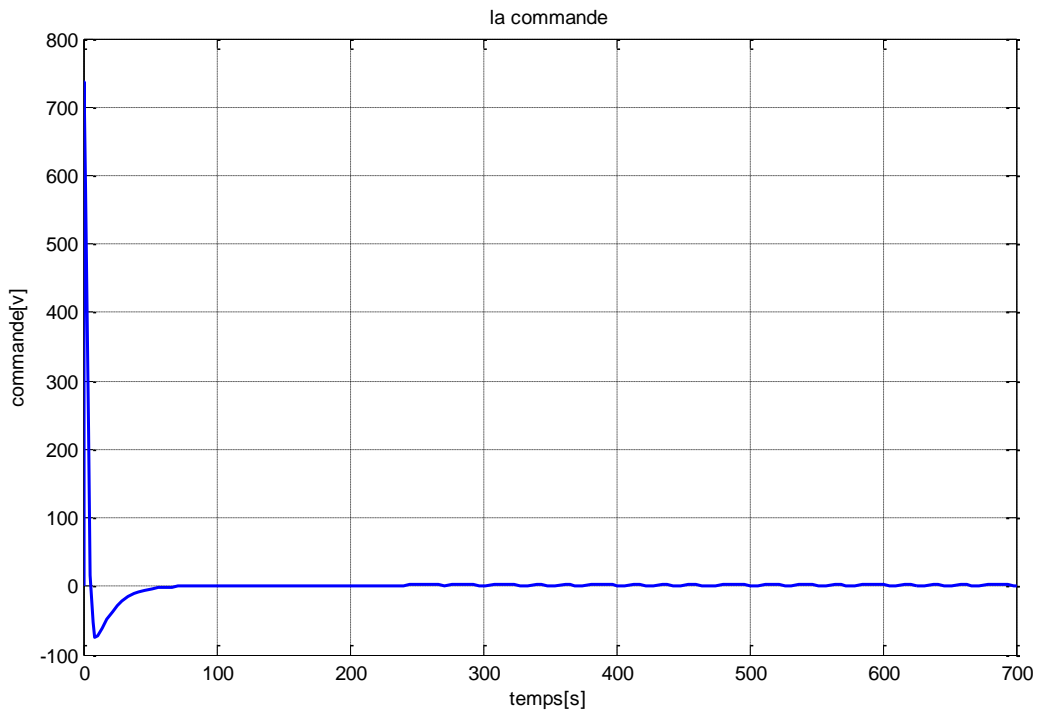
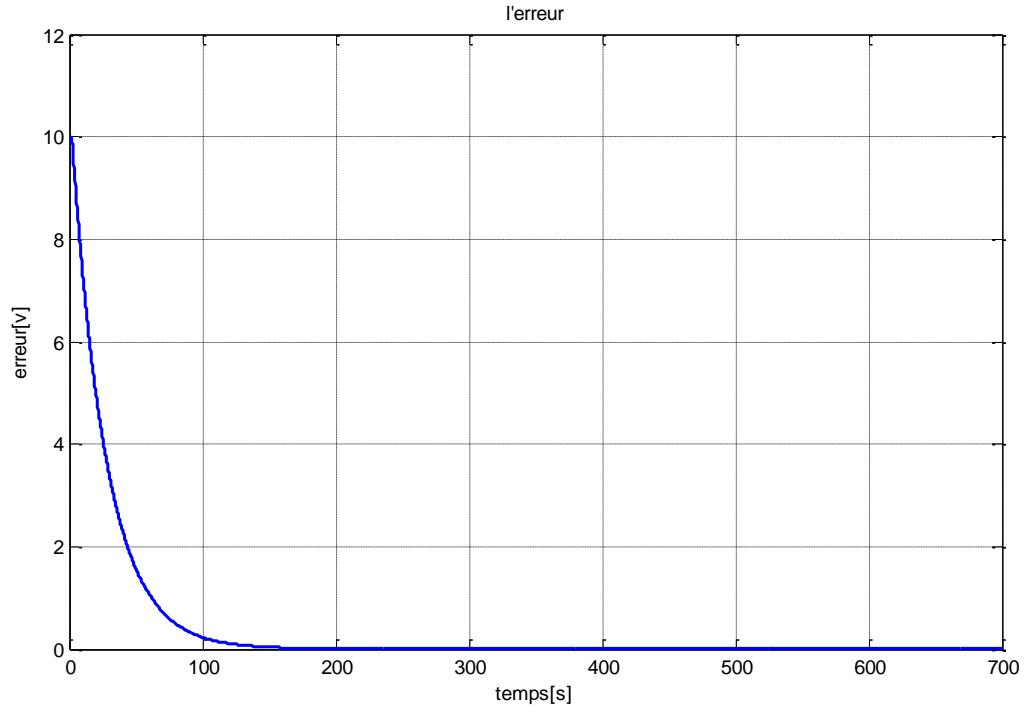


Fig. 2.4 Schéma block de la commande par linéarisation E/S.

• Les réponses :

Les résultats de la commande par linéarisation entrée-sortie appliquée au système hydraulique à réservoirs couplés sont illustrés par les figures 2.5 et 2.6, ces résultats ont été appliqués avec les paramètres $k_1 = 15$ et $k_2 = 130$.



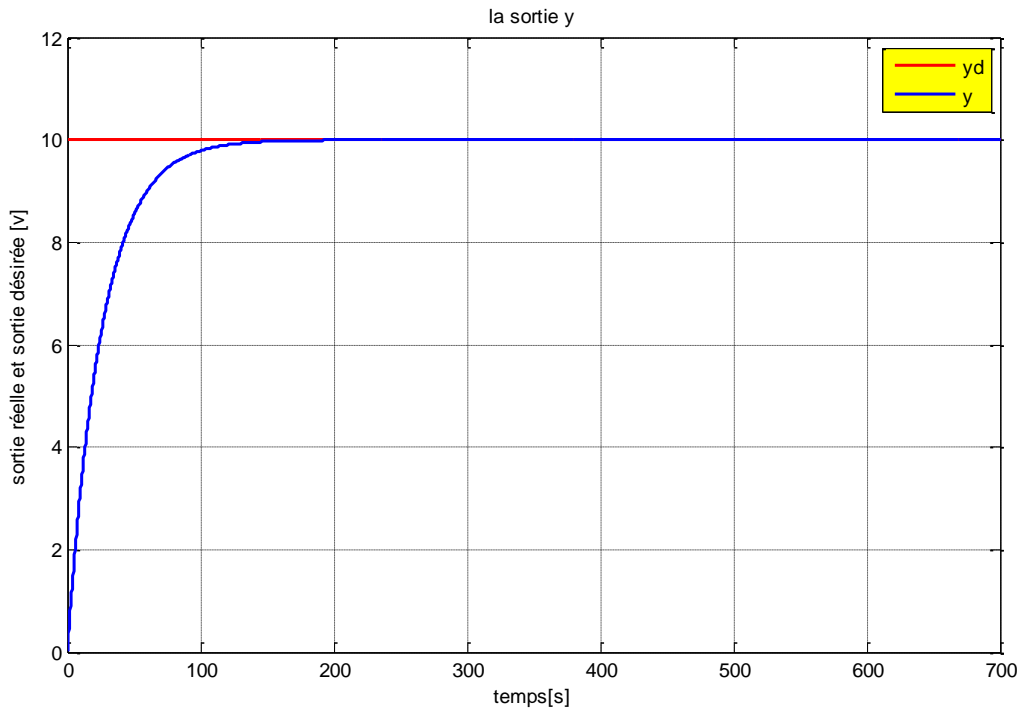
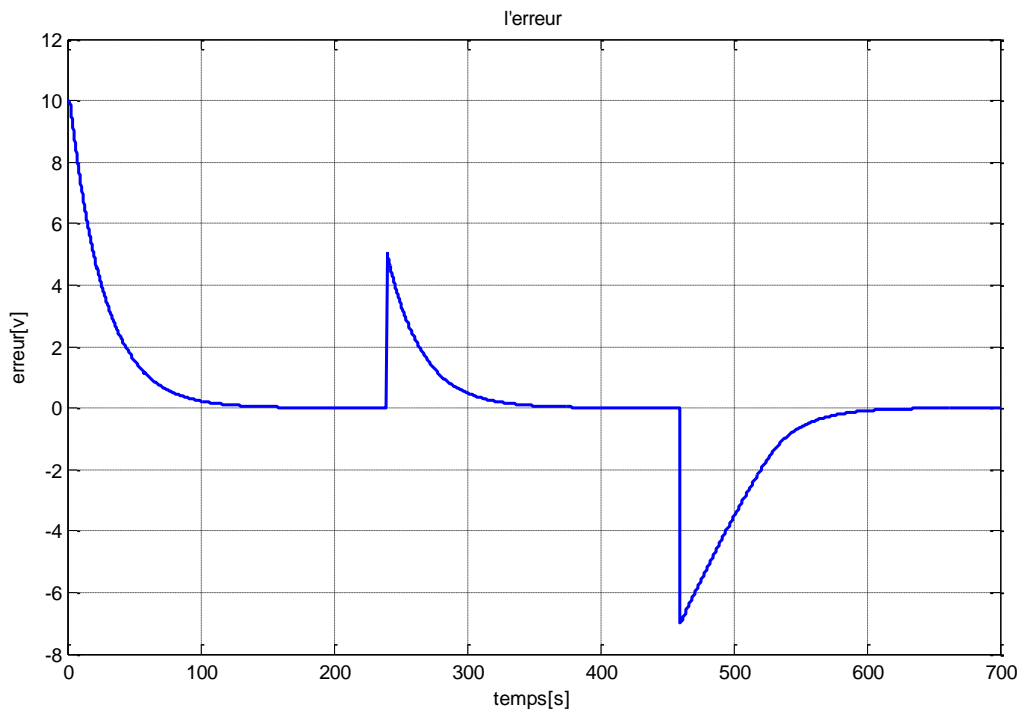


Fig. 2.5 Résultats de simulation de la commande linéarisation entrée-sortie pour une entrée échelon.



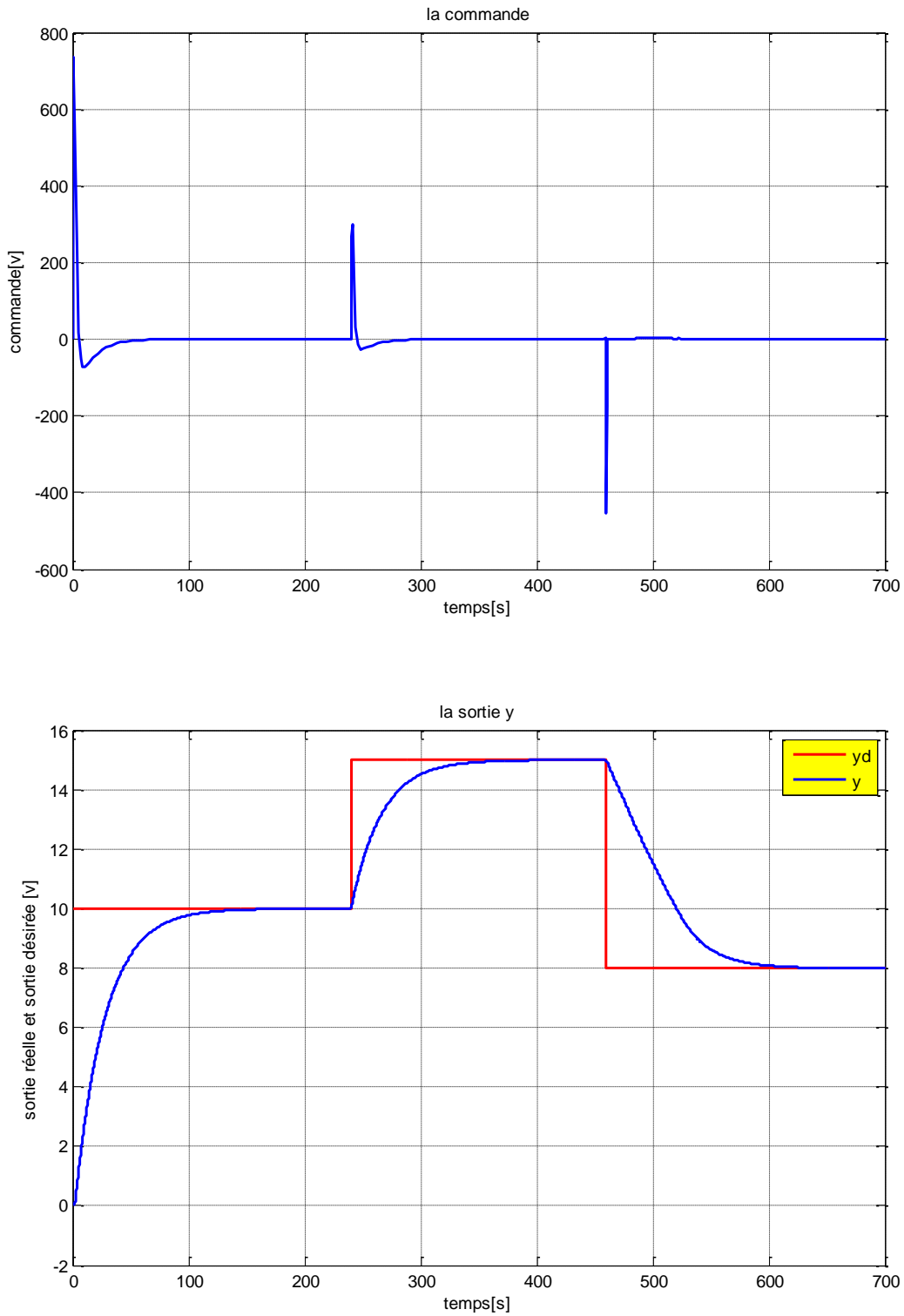


Fig. 2.6 Résultats de simulation de la commande linéarisation entrée-sortie pour une entrée carrée.

2.5.6 Commentaires sur les résultats

Les résultats de simulation de cette commande sont illustrés par la figure 2.5, à partir des résultats de simulation, nous remarquons qu'on a abouti à des résultats satisfaisants en le temps de réponse et la stabilité de systèmes et la précision de convergence vers leur y_d .

2.6 Commande par régulateur PID

Encore utilisé en raison du poids du passé, à la fois matériel et culturel :

• Matériel :

Grâce à la découverte de l'amplificateur opérationnel, le premier P.I.D. est commercialisé en 1930, puis dans les années 1940 beaucoup d'installations P.I.D. pneumatiques voient le jour, à partir des années 1970 l'arrivée des circuits intégrés permet la commande numérique beaucoup moins restrictive que le P.I.D.

• Culturel :

Plus de 70 ans d'expérience, la régulation P.I.D. reste encore la plus utilisée et bien qu'implantée en numérique, c'est toujours la version initiale du continu.

2.6.1 Principe

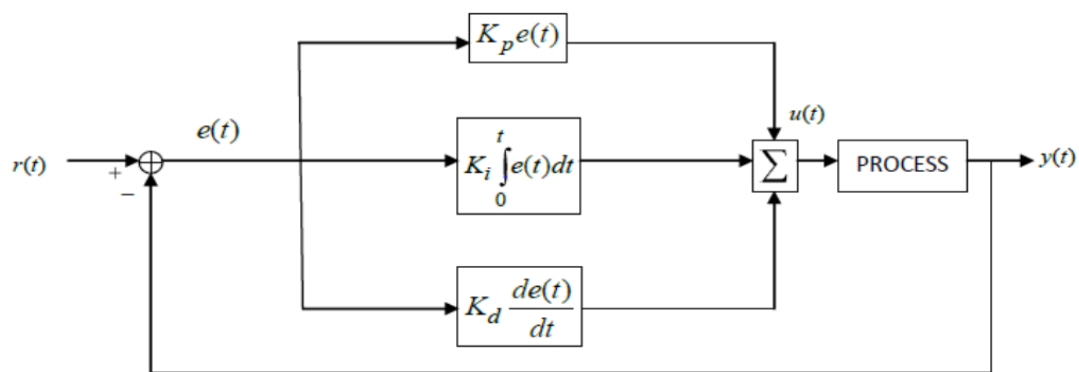


Fig 2.7 régulateur PID.

P : action proportionnelle à l'erreur de réglage (la plus naturelle).

I : action par intégration ; permet d'annuler l'erreur statique (pour une référence constante) dégrade généralement la réponse transitoire.

D : action dérivée permet d'améliorer la réponse transitoire grâce à l'effet d'anticipation.

2.6.2 Application de la commande PID sur le système CE105

Le schéma bloc de la commande est donné par la figure 2.8 :

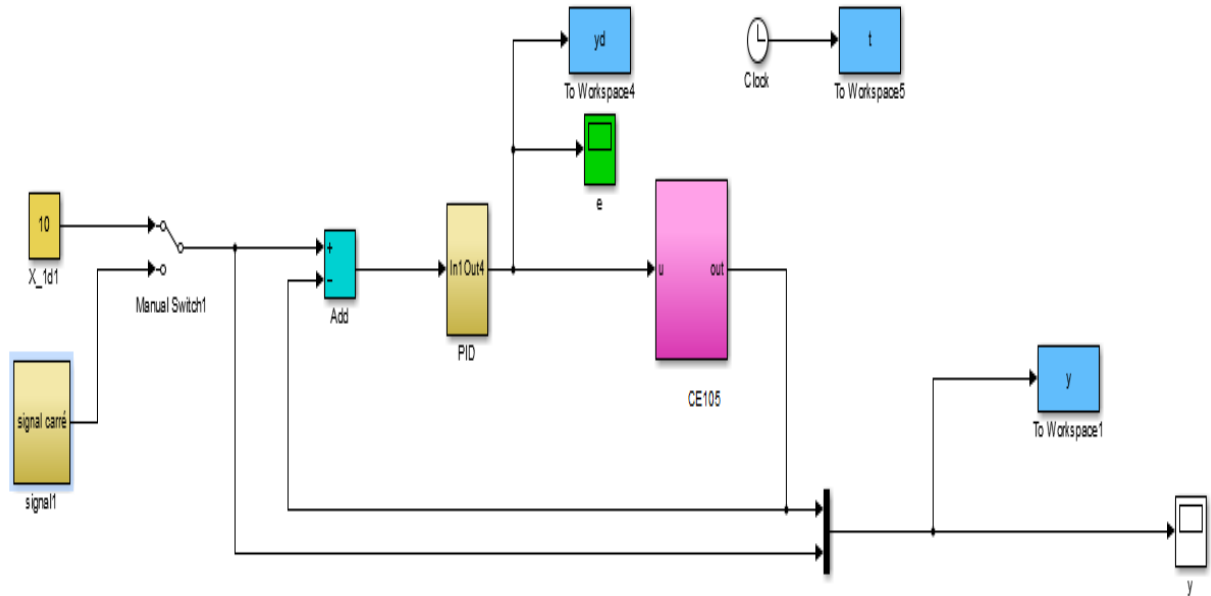


Fig. 2.8 Schéma bloc de la commande PID d'un système CE105.

2.6.3 Résultat de simulation

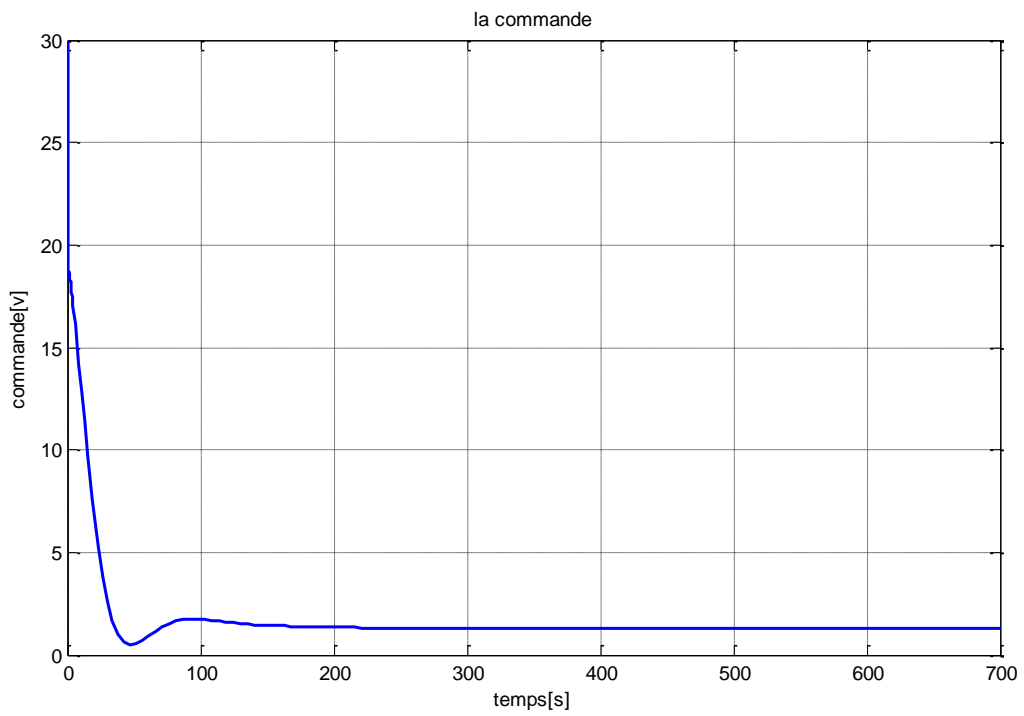
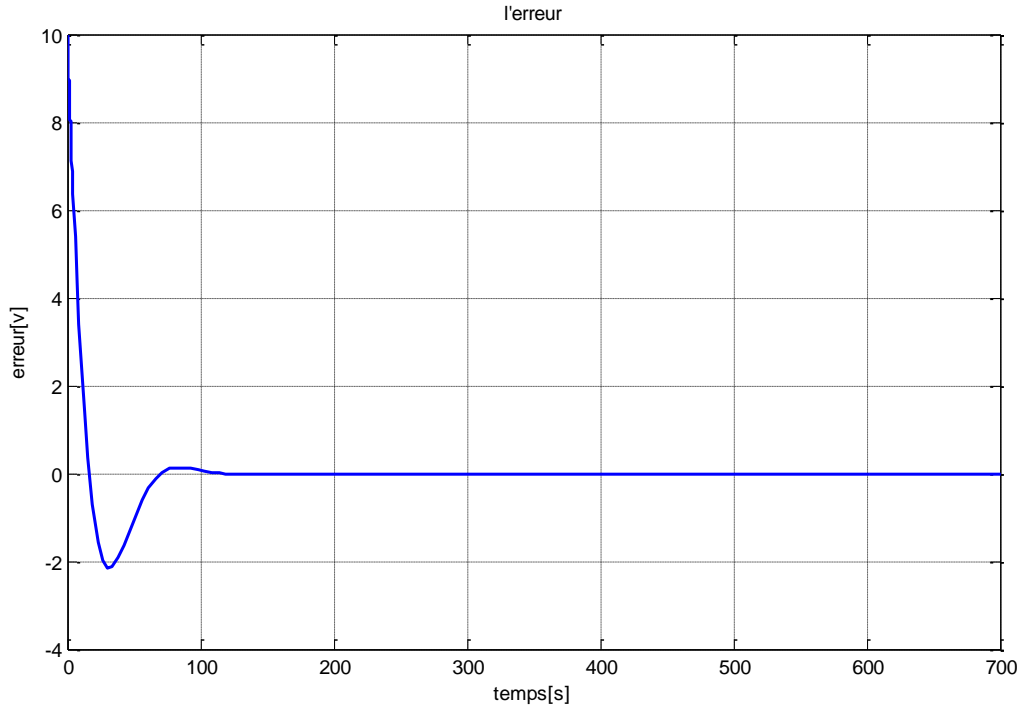
En utilisant les paramètres du contrôleur PID suivants :

Tab 2.1 les paramètres du contrôleur PID.

Paramètres	Valeur
K_P	3
K_I	0.2
P_D	13

• Les réponses :

Ces résultats ont été obtenus en utilisant le modèle mathématique du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés, avec la régulateur PID, sont illustrés par les figures 2.9 et 2.10.



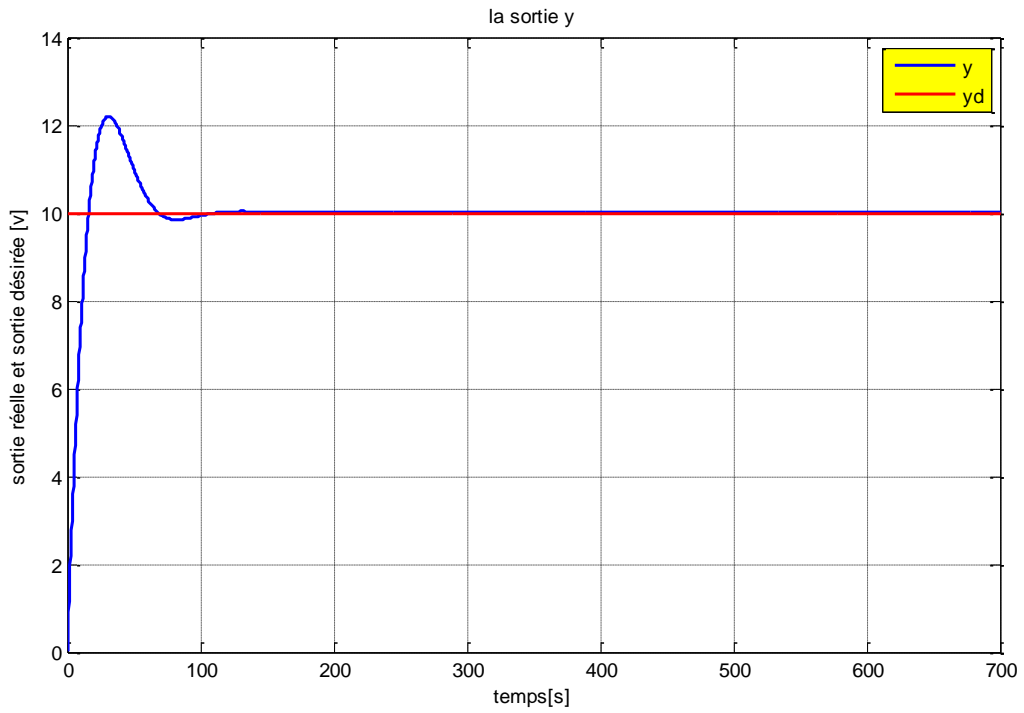
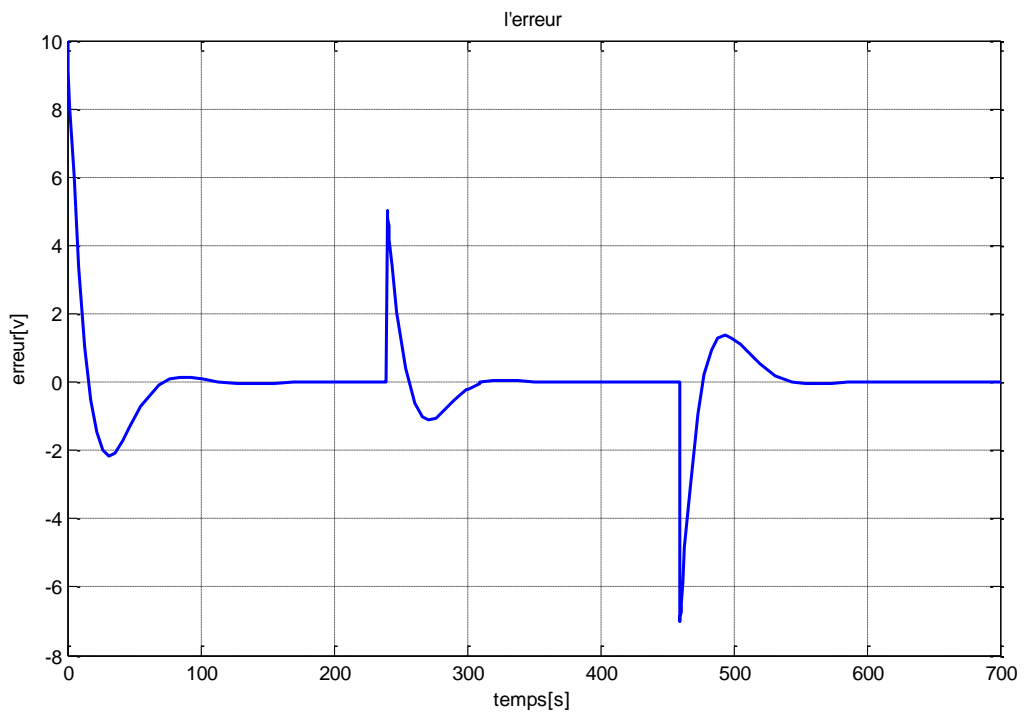


Fig. 2.9 Résultats de simulation par PID pour une entrée échelon.



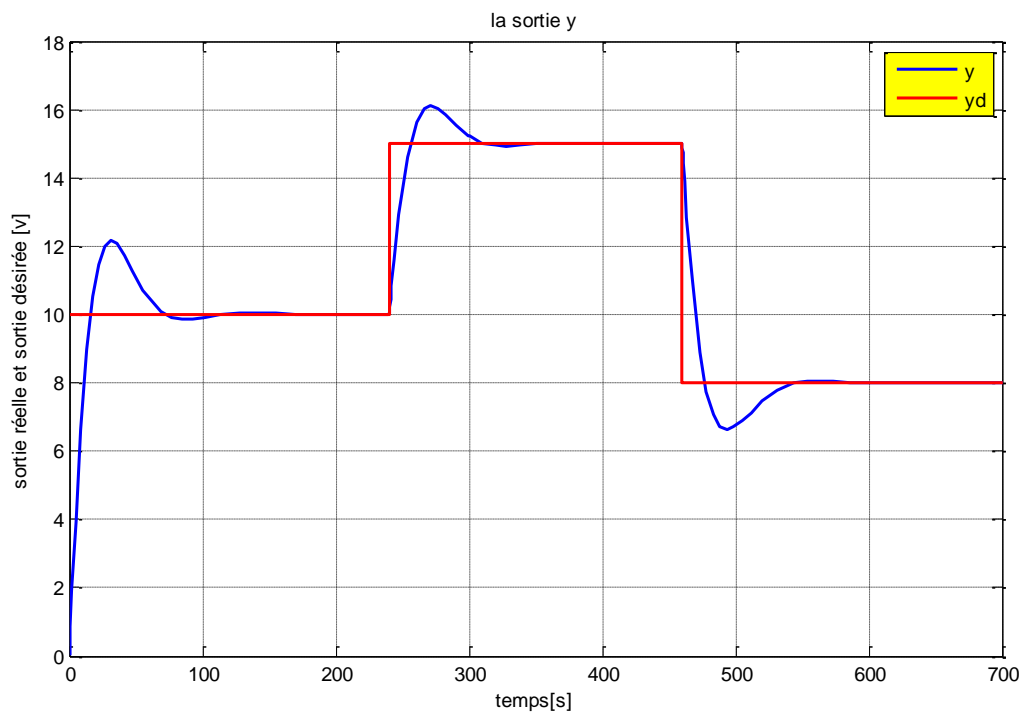
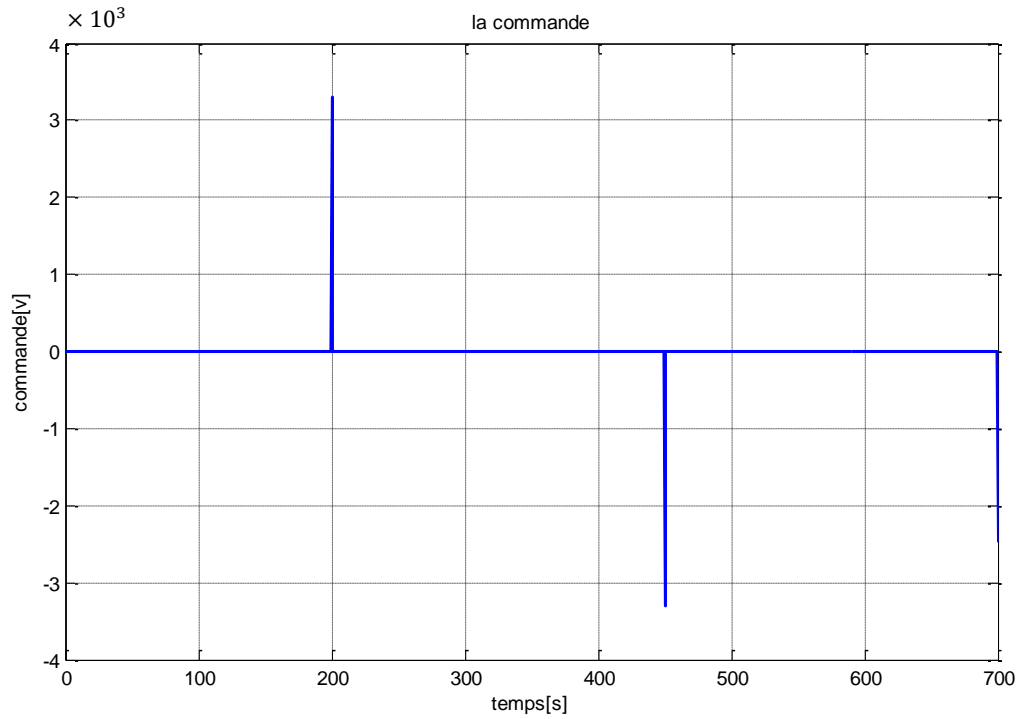


Fig. 2.10 Résultats de simulation par PID pour une entrée carrée.

2.6.4 Commentaires sur ses résultats

Les résultats de simulation de la commande par régulateur PID appliquée sur le système hydraulique CE105, sont présentés sur les figures 2.9 et 2.10. Nous remarquons qu'on a abouti à des résultats satisfaisants en termes de poursuite, ce qui est acceptable par rapport à la nature des systèmes hydrauliques. Des pics sont apparus au niveau de la commande effective, ceci est dû au changement brusque de la consigne.

2.7 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, on a présenté le contrôle d'un système à deux réservoirs basé sur la commande par linéarisation entrée-sortie. Nous avons vu que les techniques de linéarisation entrées/sorties reposent sur l'idée de transformer un système non linéaire en un système linéaire puis de lui appliquer un ordre linéaire. À titre de comparaison, le pilotage par linéarisation autour du point de fonctionnement est également présenté.

Les résultats de la simulation montrent de bonnes performances dans la régulation et le suivi des valeurs de référence requises avec une connaissance précise des valeurs des paramètres du modèle, donne de meilleurs résultats par rapport à la commande de contrôleur PID.

Chapitre 03
**Commande tolérante aux défauts d'un système
hydraulique CE105**

3.1 Introduction

La commande tolérante aux défauts est une technique utilisée dans l'ingénierie pour concevoir des systèmes qui sont capables de fonctionner malgré la présence de défauts ou de défaillances. Le problème de la commande tolérante aux défauts a été largement abordé dans ces dernières décennies et a fait l'objet d'un nombre important de résultats expérimentaux et de publications, cette approche est particulièrement importante pour les systèmes critiques tels que les avions, les centrales nucléaires ou les équipements médicaux, où une défaillance peut avoir des conséquences graves. L'objectif principal de cette commande est de déterminer une stratégie de commande qui permet d'annuler ou aux moins limiter les effets de défauts sur la stabilité et les performances du système [18].

Nous présentons, dans ce chapitre les principaux concepts de la commande tolérante aux défauts ainsi que les différentes méthodes et approches utilisées, et l'applications de cette technique sur le modèle d'un système hydraulique puis une comparaison avec la commande PID.

3.2 Systèmes de commande tolérants aux défauts (FTCS)

Un système tolérant aux défauts est généralement conçu pour continuer à fonctionner même en présence d'erreurs ou de pannes matérielles ou logicielles et capable à maintenir les objectifs nominaux en dépit de l'occurrence d'un défaut et à s'en accommoder de manière automatique [19]. La tâche principale dans un système de commande tolérante aux défauts est la synthèse de lois de commande avec une structure adéquate permettant de garantir la stabilité du système et maintenir les performances de commande proches de celles désirées [19].

On prend par exemple la catastrophe de Tchernobyl. Cet accident est nucléaire qui s'est produit le 26 Avril 1986 dans la centrale nucléaire Lénine en Ukraine. Une explosion énorme au niveau d'une centrale nucléaire, suivie d'une fusion progressive du réacteur No 4. La raison principale de cette tragédie a été l'absence d'un mécanisme d'accommodation aux défauts. Un autre exemple est la fusée Ariane 5, qui a explosé en plein vol, le 4 Juin 1996, 37 secondes après son décollage. Cela a été causé par un défaut software au niveau de l'unité de Référence Inertiel (URI) qui a fourni des informations erronées au système de contrôle. Ces dernières étaient relatives à la trajectoire et à la vitesse de la fusée. Les conséquences catastrophiques de ces pannes auraient pu être évitées, ou du moins atténuées, si le système de commande était conçu de manière à intégrer un certain degré de tolérance aux défauts [19].

Le principe de la commande tolérante aux défauts est illustré par le schéma de la figure 3.1.

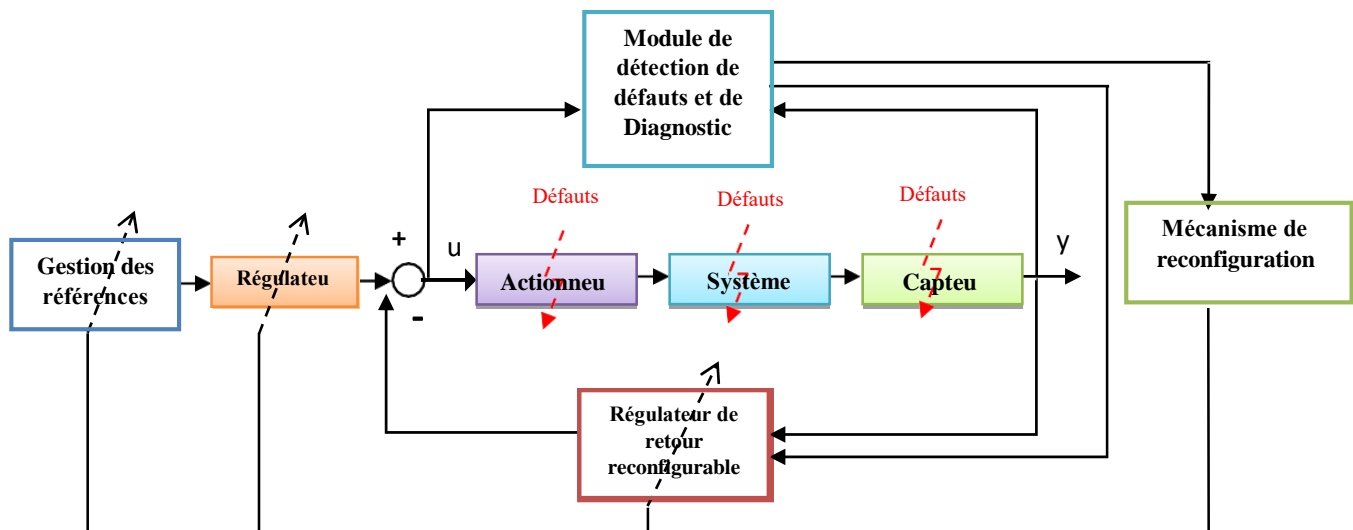


Fig. 3.1 Principe d'un système de commande tolérante aux défauts.

3.3 Classification des défauts

Les défauts qui se produisent dans un système peuvent être de différents types et sont généralement classés en défauts d'actionneur, de capteur ou de système. Ainsi on pourra être amené à détecter des biais, des dérives et/ou des valeurs aberrantes. De plus, toujours en fonction de l'impact sur les systèmes, les défauts peuvent être classés comme additifs ou multiplicatifs. La commande à haute disponibilité est impérative dès que des défauts sont détectés.

3.3.1 caractéristiques temporelles

Les défauts peuvent être classés selon leur évolution temporelle en trois catégories distinctes comme suit [20] :

- **Défaut brusque (biais) :** Ce type de défaut apparaît à un instant donné, son amplitude est constante non nulle, souvent causé par des dommages matériels. Ils peuvent être graves en affectant la performance et/ou la stabilité du système commandé (figure 3.2.a).
- **Défaut intermittent (valeurs aberrantes) :** Ce type de défaut est un cas particulier de défaut brusque, le signal dans ce cas revient de façon aléatoire à sa valeur normale. Il est causé par exemple par les défauts de connexion, d'alimentation ou un faux contact (figure 3.2.c).
- **Défaut graduel (dérives) :** Ce type de défaut apparaît à un instant donné, son amplitude augmente proportionnellement avec le temps, souvent dû aux vieillissements, il est plus

difficile à détecter en raison de sa dynamique lente, mais moins grave (figure 3.2.b).

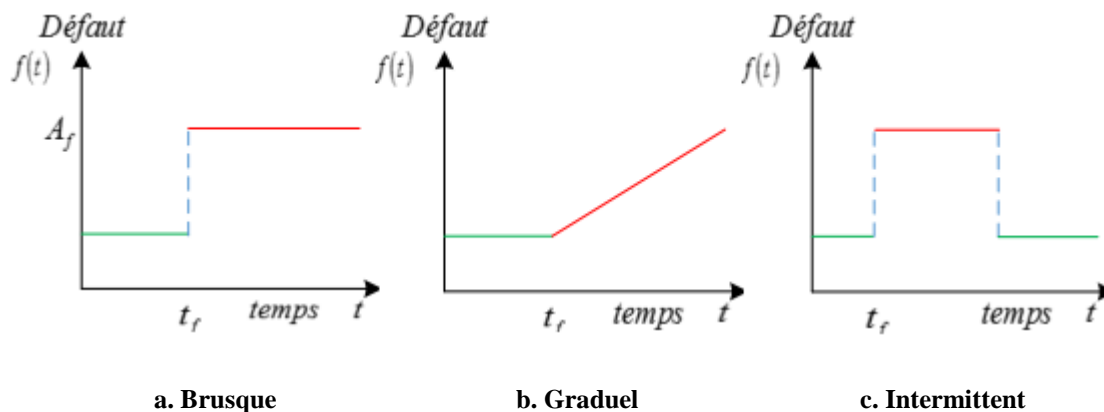


Fig. 3.2 Classification des défauts selon leur évolution temporelle.

3.3.2 Les types des défauts

Les défauts sont des événements qui apparaissent aux différents endroits du système. Selon leurs emplacements, trois type de défauts peuvent être définies (figure 3.3) :

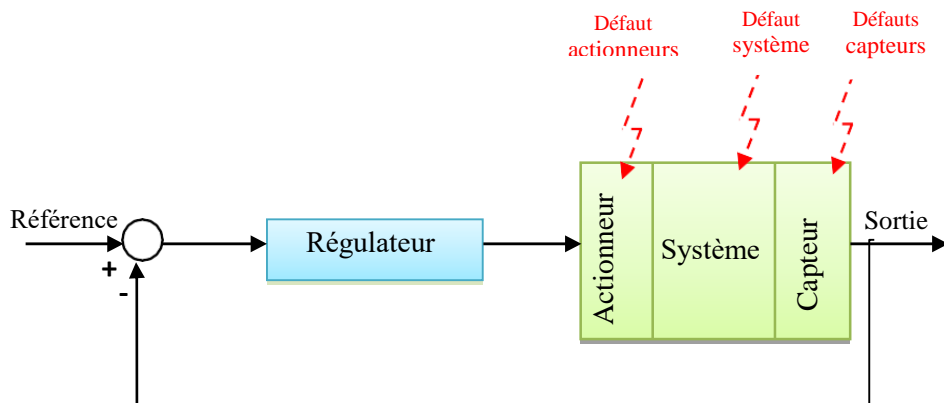


Fig. 3.3 Boucle de régulation et différents défauts agissants.

- **Défauts d'actionneurs** : agissant au niveau de la partie opérative du système de commande. Ils conduisent à une perte partielle ou totale du signal de commande.
- **Défauts de capteurs** : Ce type de défaut est la cause d'une mauvaise image de l'état physique du système. Un défaut capteur partiel produit un signal avec plus ou moins d'adéquation avec la valeur vraie de la variable à mesurer. Un défaut capteur total produit une valeur qui n'est pas en rapport avec la grandeur à mesurer [21].
- **Défauts composants ou systèmes** : Ce sont des défauts qui apparaissent dans les composants du système lui-même, c.-à-d. les défauts qui ne peuvent pas être classés

ni parmi les défauts capteurs, ni parmi les défauts actionneurs. Ils représentent des changements dans les paramètres du système, ce qui induit un changement du comportement dynamique de ce dernier [22].

3.3.3 Classification selon leur représentation

Comme le montrent la Figure 3.4, selon l'impact sur les performances du système, les défauts peuvent être divisés en défauts additifs et en défauts multiplicatifs. Les défauts sont additifs s'ils affectent le comportement du processus indépendamment des entrées connues (par exemple, les pannes d'actionneur et les pannes de capteur). S'ils affectent le processus d'une manière qui dépend d'entrées connues, ils sont considérés comme multiplicatifs (défaillance du système).



Fig. 3.4 Types des défauts.

3.4 Classification des approches FTC

L'objectif principal du contrôle tolérant aux défauts est d'identifier une stratégie de contrôle qui peut éliminer ou au moins limiter l'impact des défauts sur la stabilité et les performances du système.

Le diagramme de la figure 3.5 illustre cette classification.

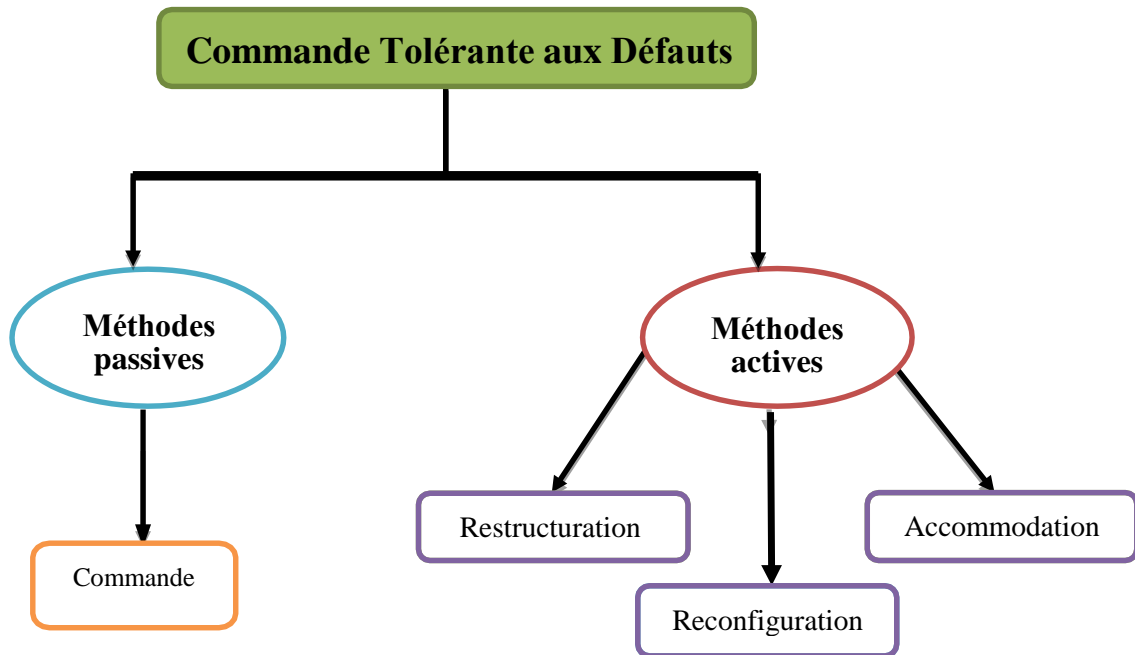


Fig. 3.5 Classification des commandes tolérantes aux défauts.

3.4.1 Commande tolérante aux défauts passive (Passive Fault Tolerant Control, PFTC)

Dans cette approche la FTC est capable à tolérer un certain ensemble de défauts en tenant compte de ces fautes lors de la conception du contrôleur. Le système de commande peut tolérer ce genre de défauts sans modifier la stratégie de commande ni les paramètres du contrôleur. Elle utilise les techniques de la commande robuste par rapport aux incertitudes structurées et perturbations extérieures qui sont les défauts (Commande par linéarisation entrée/sortie, commande H_∞ , commande rejet de perturbations, commande en mode glissant, . . .) [23]. De plus, la stabilité du système ne peut pas être garantie quand une faute imprévisible se produit.

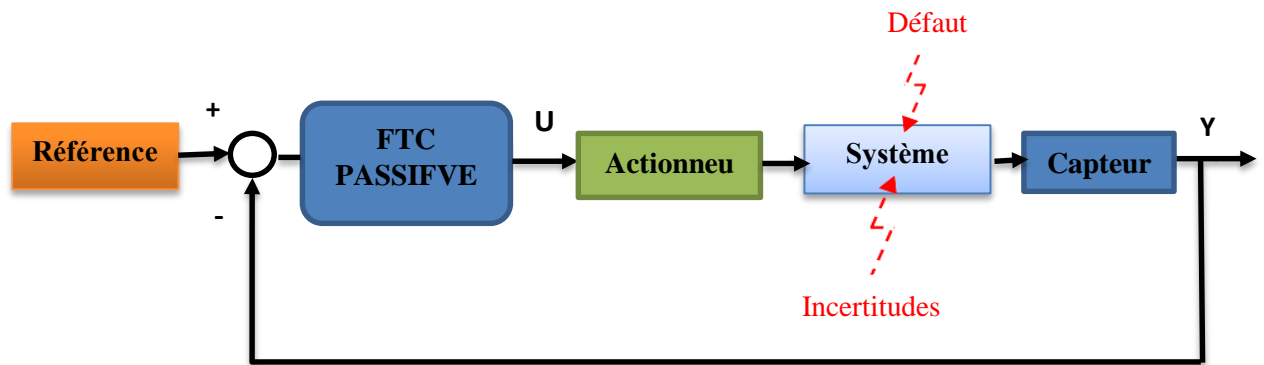


Fig. 3.6 Schéma de principe d'une loi de commande FTC passive.

3.4.2 Commande tolérante aux défauts active

Dans cette approche, le FTC réagit à l'apparition d'un ou plusieurs défauts en reconfigurant la loi de commande en ligne pour maintenir la stabilité du système et les performances nominales. Des outils efficaces de détection et d'isolement des pannes sont alors nécessaires pour détecter et localiser des défauts affectant le système en ligne. Le principe d'activation de la commande FTC est illustré à la figure 3.7.

Le bloc Fault Detection and Identification (FDI) utilise les entrées et sorties mesurées du système pour détecter et estimer les défauts et les variables d'état du système en ligne. Une fois qu'un défaut se produit, le bloc "FDI" fournit des informations en ligne sur l'état du système et le défaut (moment d'apparition, type et ampleur du défaut) ainsi que le modèle de défaut du système de congestion "FTC".

Le bloc "FTC" accomode ou reconfigure en ligne la loi de commande afin de maintenir la stabilité, la dynamique du système ainsi que ses performances nominales basant sur les informations délivrées par le bloc "FDI" [19].

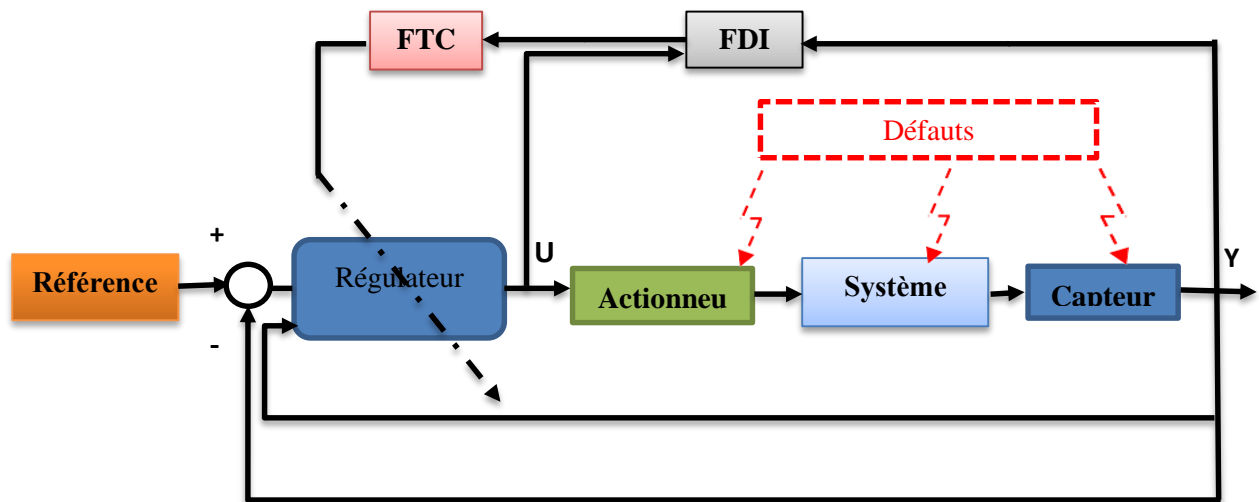


Fig. 3.7 Schéma de principe d'une loi de commande FTC active.

Les lois de commande active s'inspirent de deux lois de commande [24].

a) Lois de commande pré-calculées :

Chaque mode de fonctionnement dispose d'un ensemble de régulateurs pré-calculés. Un régulateur pour le mode de fonctionnement nominal et un pour chaque mode de défaillance. Cela semble déraisonnable dans le cas d'un grand nombre de défauts, car cela nécessiterait également la synthèse d'un grand nombre de régulateurs, nous nous intéressons donc à une deuxième approche basée sur nouvelles lois de commande en ligne.

b) Lois de commande synthétisées en ligne :

Suivant le défaut, en fonction de sa rigidité et les informations qui peuvent être fournies par le bloc du diagnostic, trois cas peuvent être considérés : l'accommodation, la reconfiguration et la restructuration du système.

➤ **L'accommodation des défauts :**

Uniquement les défauts de faibles amplitudes sont pris en compte par l'accommodation. La nouvelle loi de commande est générée par l'adaptation en ligne des paramètres du régulateur, sans modifier la structure du système.

➤ **La reconfiguration du système :**

Elle est utilisée dans le cas où les parties défaillantes (actionneurs, capteurs ou régulateurs) ne peuvent pas être accommodées. Elle est caractérisée par la modification de la structure du système de façon à compenser le défaut.

➤ **La restructuration du système :**

Elle est utilisée dans le cas où les parties défaillantes ne peuvent pas être accommodées, la structure et les paramètres de la loi de commande sont modifiés à compenser le défaut.

Le grand inconvénient de l'approche active est la limitation du temps disponible pour recalculer la nouvelle loi de commande à chaque instant de détection d'un défaut [19].

3.5 FTC active pour les systèmes non linéaires

Dans le cas d'un modèle non linéaire, de nombreuses techniques de FTC active existent. Nous pouvons citer :

3.5.1 Méthode basée sur banc de régulateurs

Son principe repose sur l'existence d'un ensemble de régulateurs pré-calculés pour chaque mode de fonctionnement. Il est également appelé "contrôle multi-modèle", où les modèles dérivent tous les cas possibles du système, où chaque modèle représente un type de fou. Ainsi, pour chaque modèle, un régulateur a été synthétisé.

L'objectif de cette méthode est de synthétiser en ligne la loi de commande à appliquer au système en utilisant une logique de commutation liant les différentes lois de commande issues de chaque régulateur. Ces régulateurs sont pondérés à travers des fonctions d'activation. La combinaison de ces lois de commande permet notamment de synthétiser une loi de commande globale sur le système [21].

3.5.2 Méthode basée sur la commande prédictive

Maciejowki a montré le potentiel du contrôle prédictif pour résoudre le problème de l'accommodation aux défauts. Cette approche permet de recalculer le correcteur en cas de défaillance pour garantir la stabilité du système et maintenir des performances très proches du système nominal. Cependant, la plupart de ces méthodes sont encore valables sous certaines hypothèses, le modèle de défaillance (et son effet sur le système) doit être parfaitement compris, les défaillances considérées doivent être de faible ampleur afin que les objectifs que le système tente d'atteindre restent inchangés après l'apparition des défauts [23].

3.5.3 Méthode basée sur la commande adaptative

Cette approche comprend l'ensemble des techniques utilisées pour l'ajustement automatique en temps réel des régulateurs, afin de maintenir un certain niveau de performances quand des paramètres du procédé à commander sont inconnus et/ou variant dans le temps [19].

3.5.4 Méthode basée sur la logique floue

La logique floue a été utilisée pour concevoir des stratégies de contrôle tolérantes aux défauts pour les systèmes non linéaires. Une technique de régulation basée sur la commande floue adaptatif a été développée qui permet l'apprentissage en ligne de nouvelles dynamiques inconnues causées par l'apparition de défauts.

Les méthodes d'accommodation aux défauts basées sur la logique floue ont été également appliquées à plusieurs systèmes non linéaires, comme par exemple, une chaudière à gaz, un système d'air conditionné, un moteur, une centrale nucléaire, et un avion. Les modèles flous de types Takagi-Sugeno ont été utilisés en FTC à l'aide d'observateurs et de régulateurs Takagi-Sugeno [22].

3.5.5 Méthode basée sur les réseaux de neurones

Les stratégies d'AFTC basées sur les réseaux de neurones, ont aussi reçu une grande attention de la communauté s'intéressant à la commande tolérante aux défauts. Une approche permettant d'estimer le défaut en ligne à l'aide de réseaux de neurones a été développée. Cette estimation sert aux mêmes temps au diagnostic et à l'accommodation aux défauts. L'accommodation est assurée en ajoutant des nouvelles lois l'adaptation en ligne des paramètres du correcteur. Une procédure systématique pour la mise en œuvre d'un algorithme d'estimation non linéaire a été développée. En se basant sur la théorie de Lyapunov, un schéma d'apprentissage a été également proposé. Cette approche est valable pour une classe particulière de systèmes multivariables non linéaires soumis à des défauts de type biais uniquement, en supposant que tous les états du système soient mesurés de ces dernières [21].

3.6 les résultats de la simulation

3.6.1 défaut actionneur

Le défaut de l'actionneur est supposé additif et modélisé par une augmentation de $H\%$ des signaux de commande (rect). on suppose que le défaut apparaît à l'instant $t_1=380s$ et disparaît à l'instant $t_2=420s$ figure 3.8.

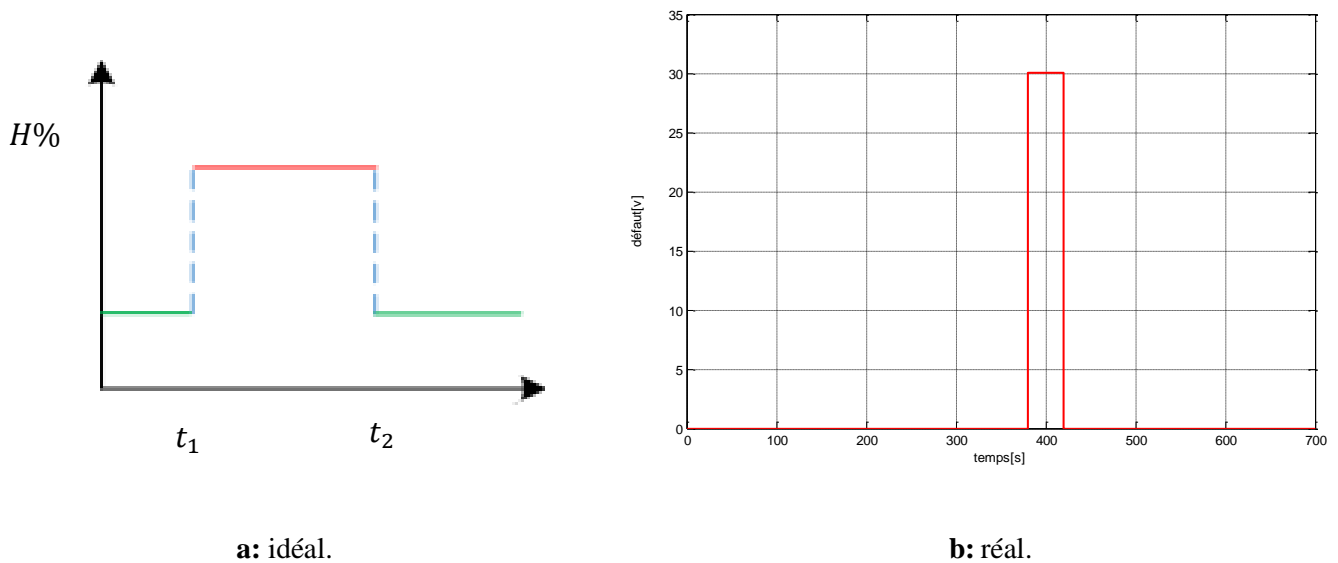


Fig. 3.8 type de défaut actionneur ajouter à la commande u.

La fonction peut être considérée comme un signal :

$$f_a(t) = H \cdot \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T}\right) = u(t - t_1) - u(t - t_2) \quad 3.1$$

tel que :

rect : la fonction rectangulaire.

H : est l'amplitude.

T : la durée du défaut.

τ : le centre de la rect.

u : est la fonction échelon , avec $t_2 > t_1$.

Les réponses :

Les résultats de la commande par linéarisation entrée-sortie et régulateur PID appliquées au système hydraulique à réservoirs couplés avec défaut actionneur variable (30v et 70v,100v) sont illustrés par les figures 3.10 à 3.18.

➤ Simulation avec Le défaut

Teste(1) : défaut=30v

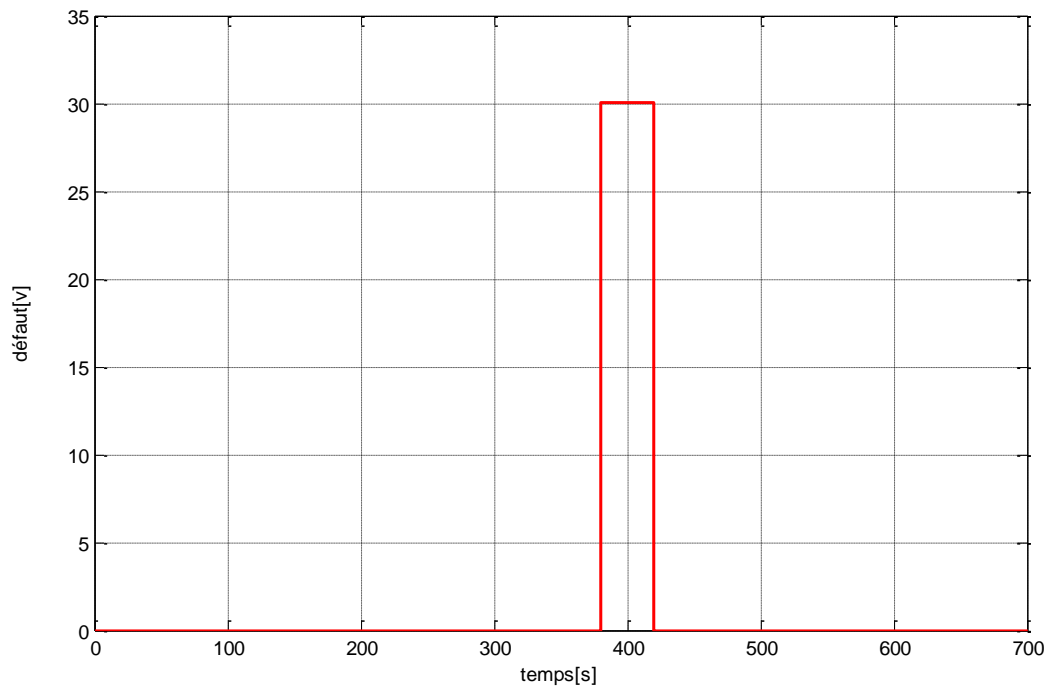
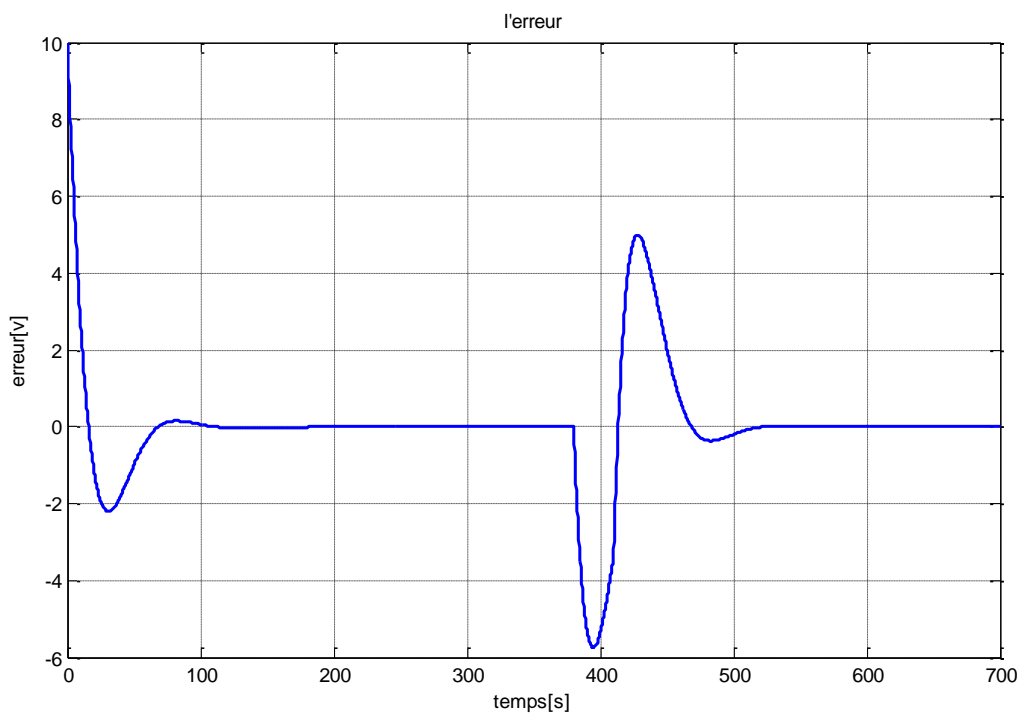


Fig. 3.9 l'évolution de défaut actionneur.

➤ Résultats de la simulation (PID)



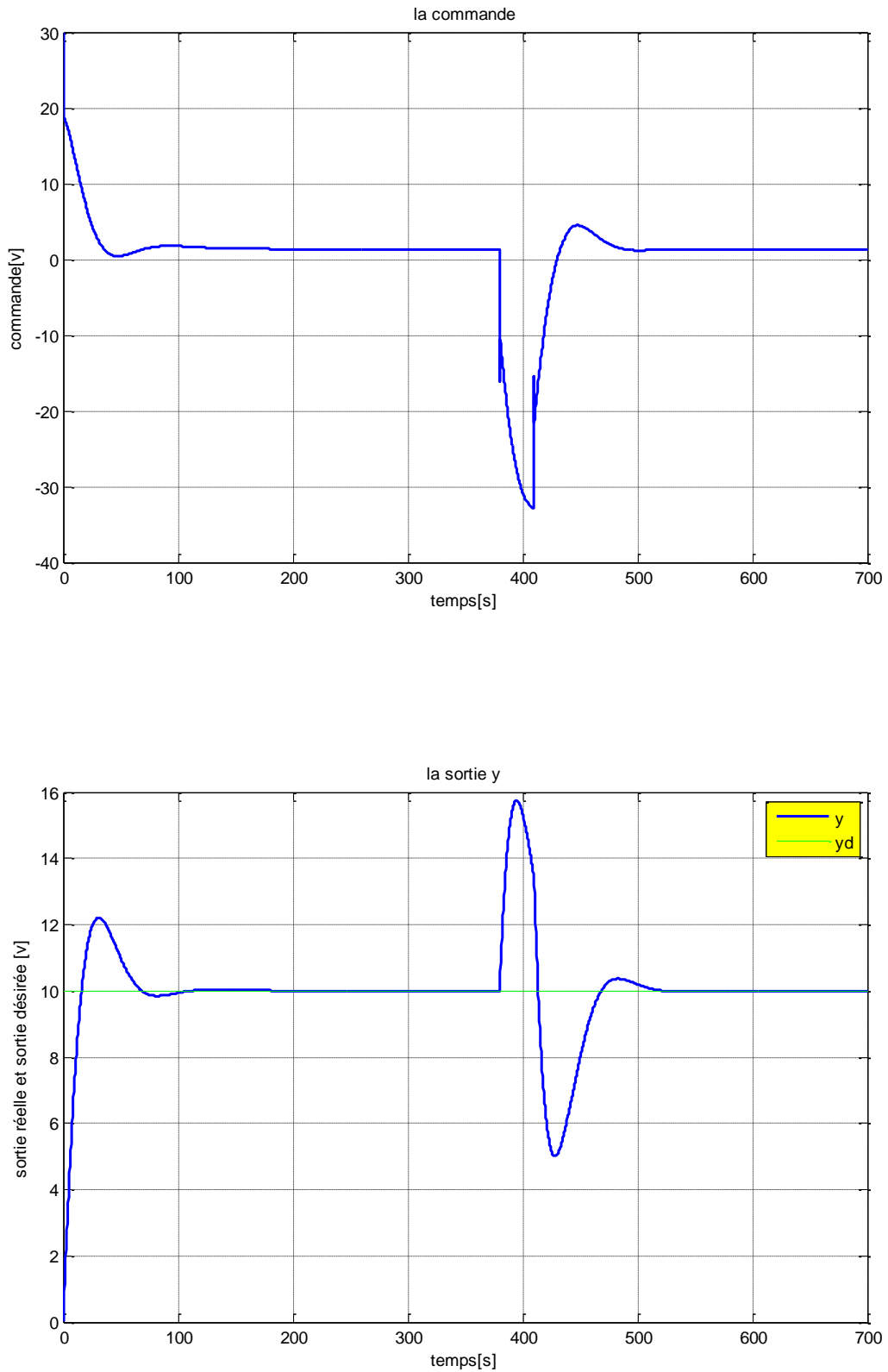
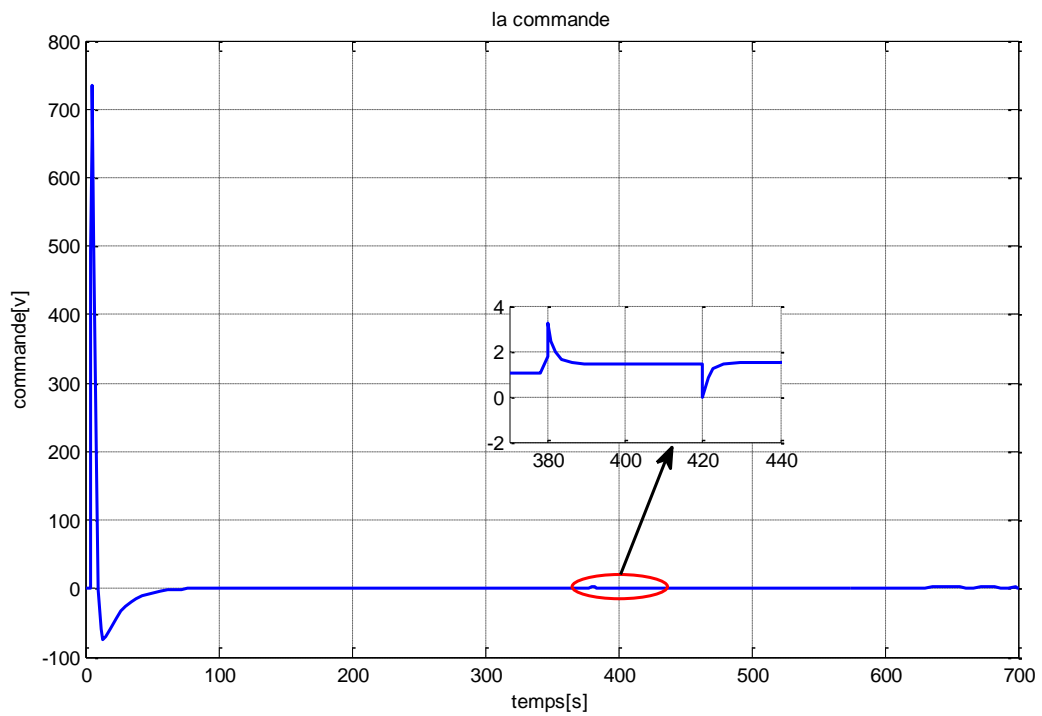
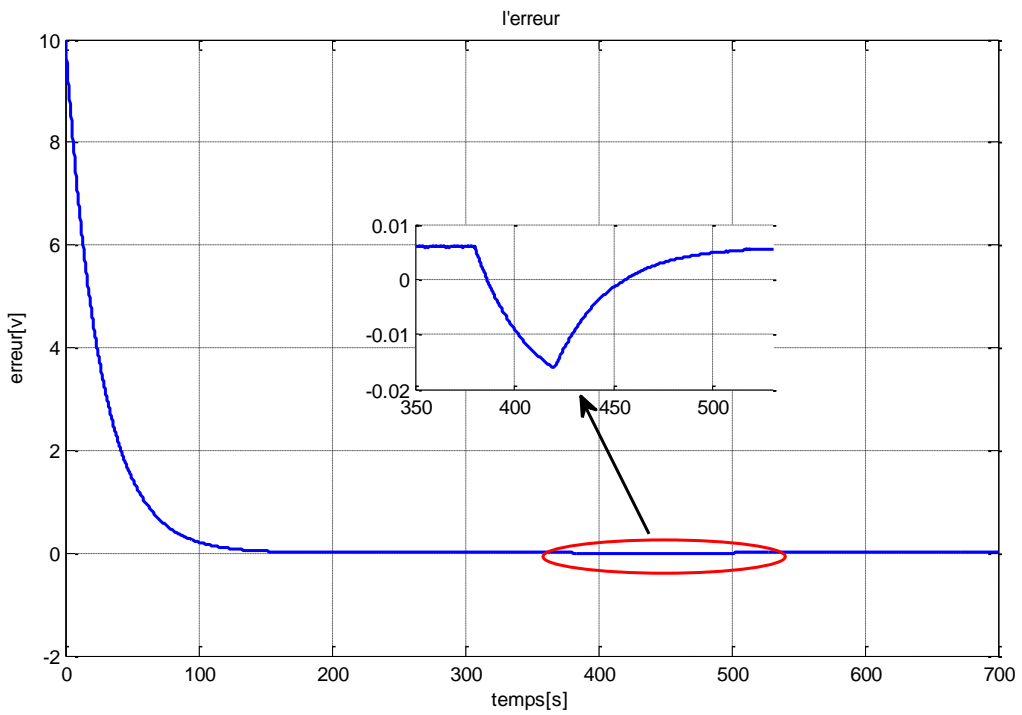


Fig. 3.10 résultats de simulation de la commande par contrôleur PID (avec défaut).

➤ Résultats de la simulation (FLC)



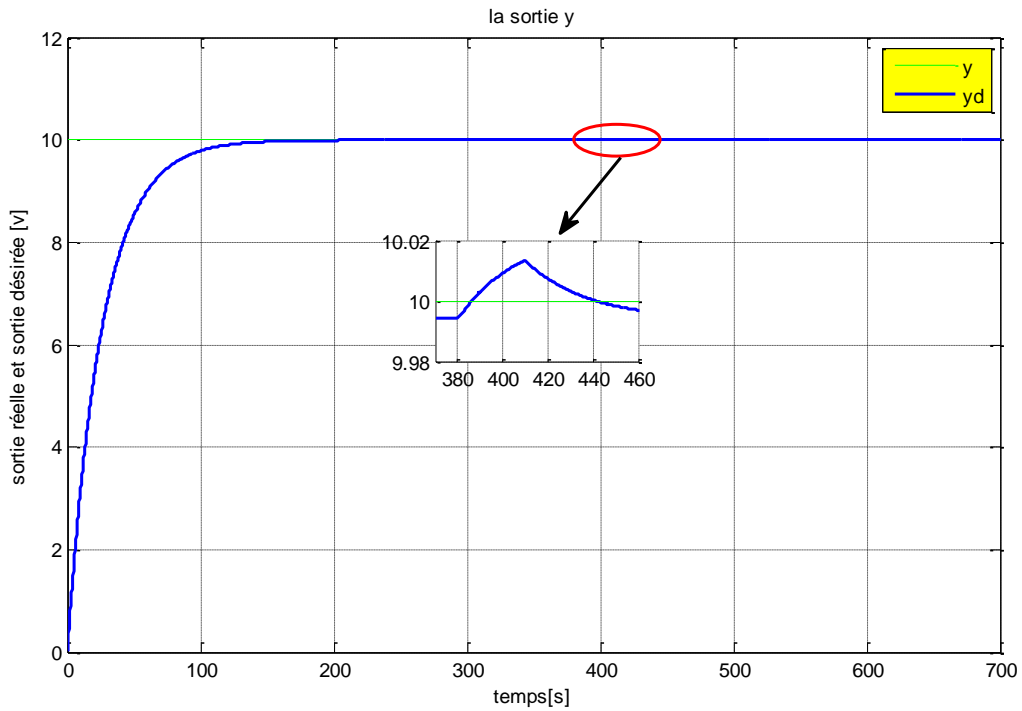


Fig. 3.11 résultats de simulation de la commande par linéarisation entrée/sortie (avec défaut).

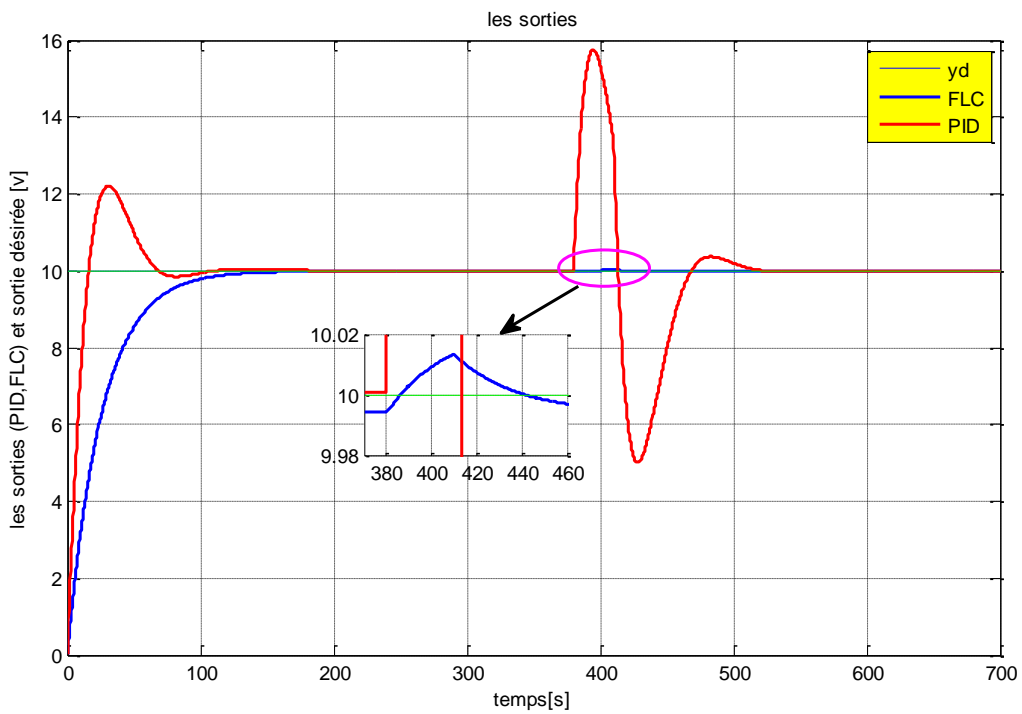
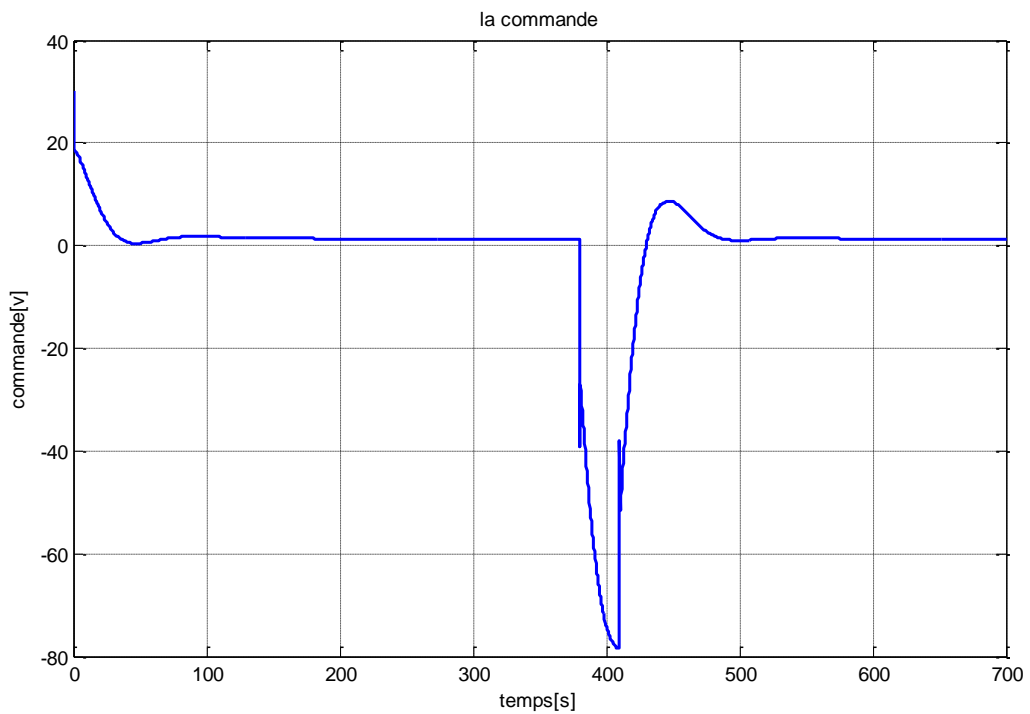
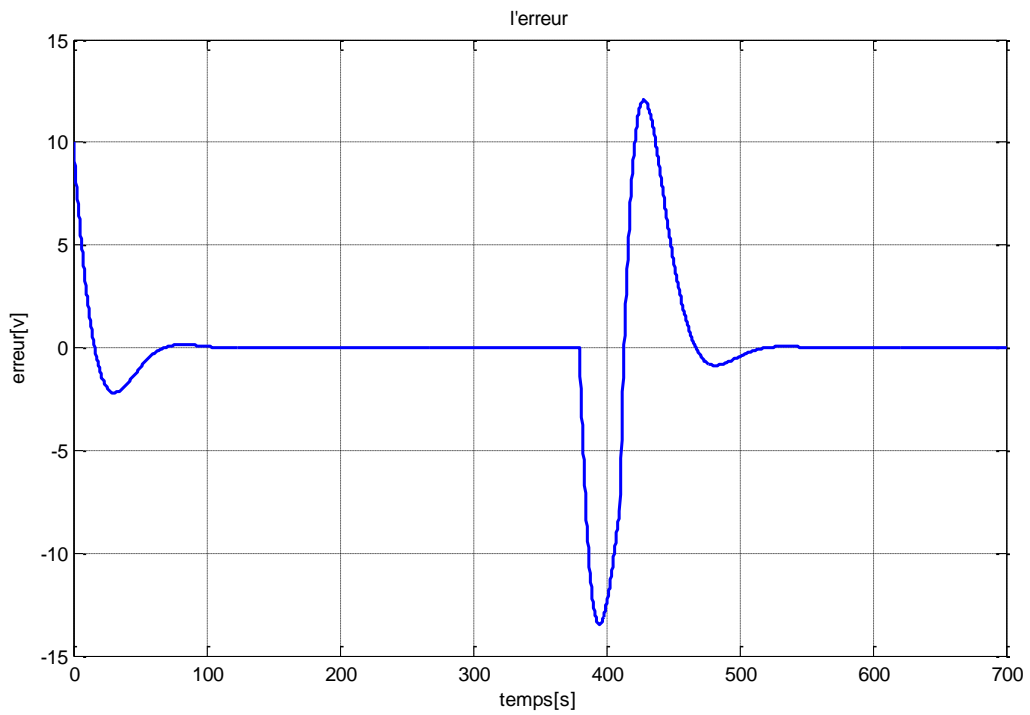


Fig. 3.12 résultats de simulation de la commande (PID et FLC) (avec défaut).

Teste(2) : défaut=70v

➤ Résultats de la simulation (PID)



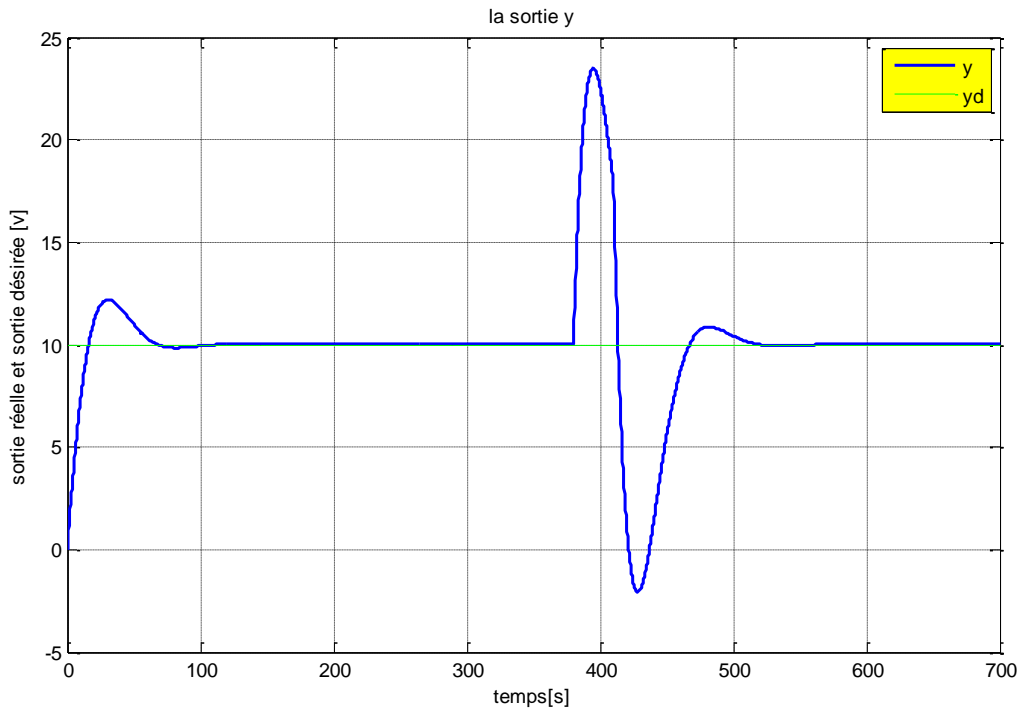
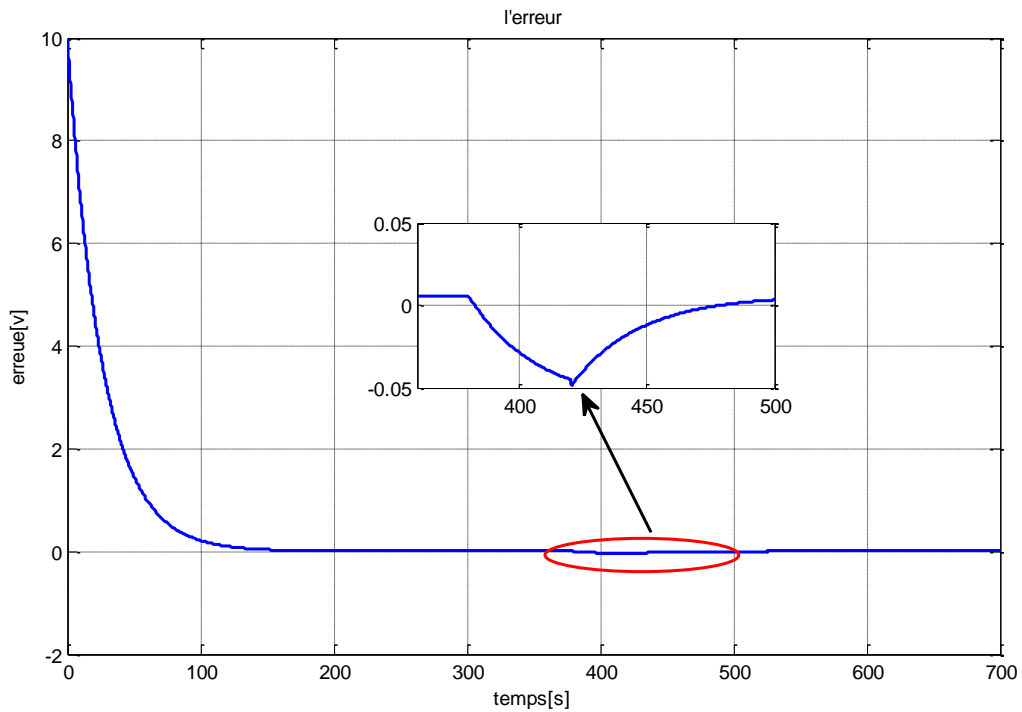


Fig. 3.13 résultats de simulation de la commande par contrôleur PID (avec défaut).

➤ Résultats de la simulation (FLC)



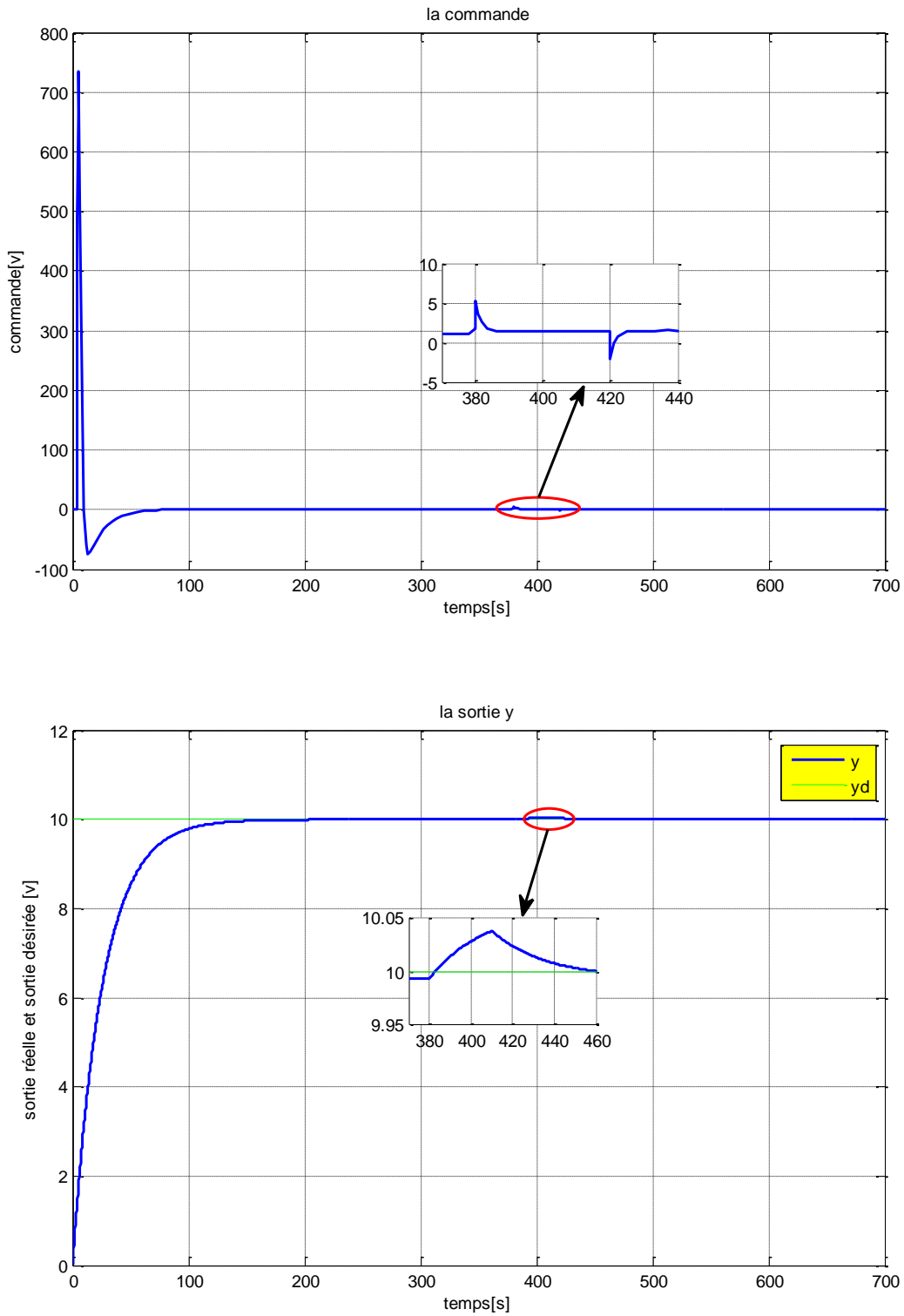


Fig. 3.14 résultats de simulation de la commande par linéarisation entrée/sortie (avec défaut).

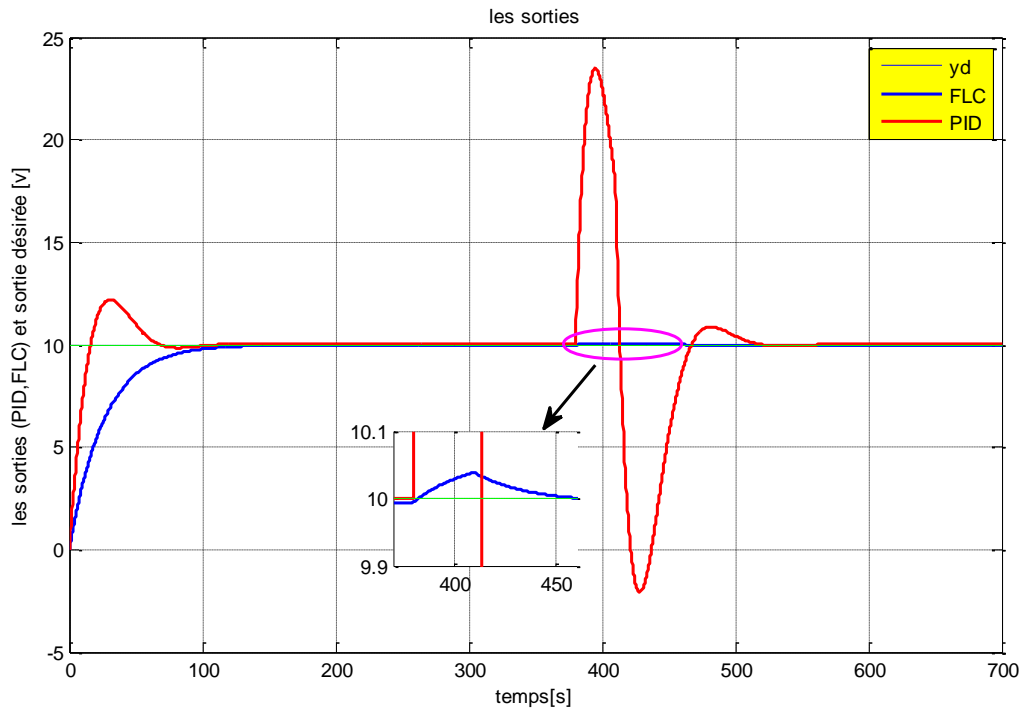
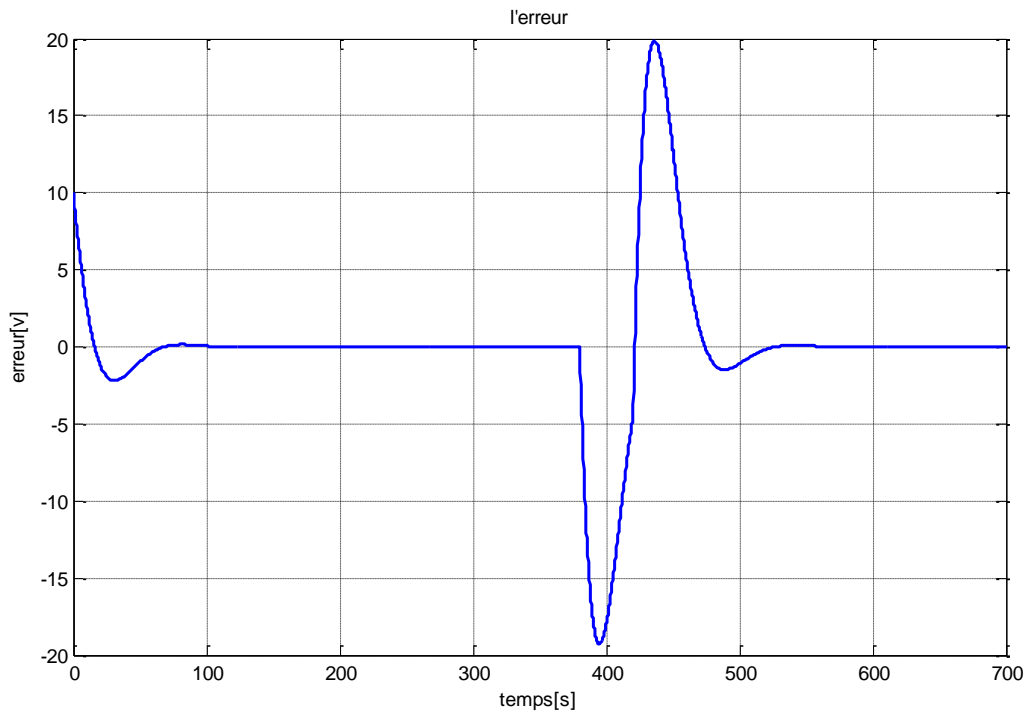


Fig 3.15 résultats de simulation de la commande (PID et FLC) (avec défaut).

Teste(3) : défaut=100v

➤ Résultats de la simulation(PID)



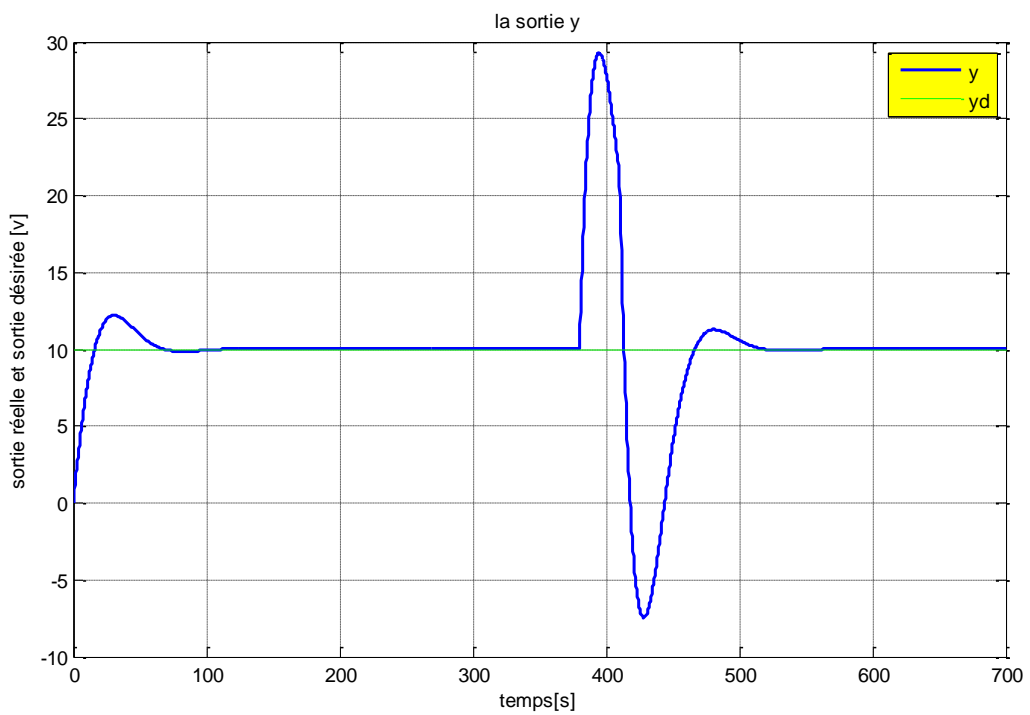
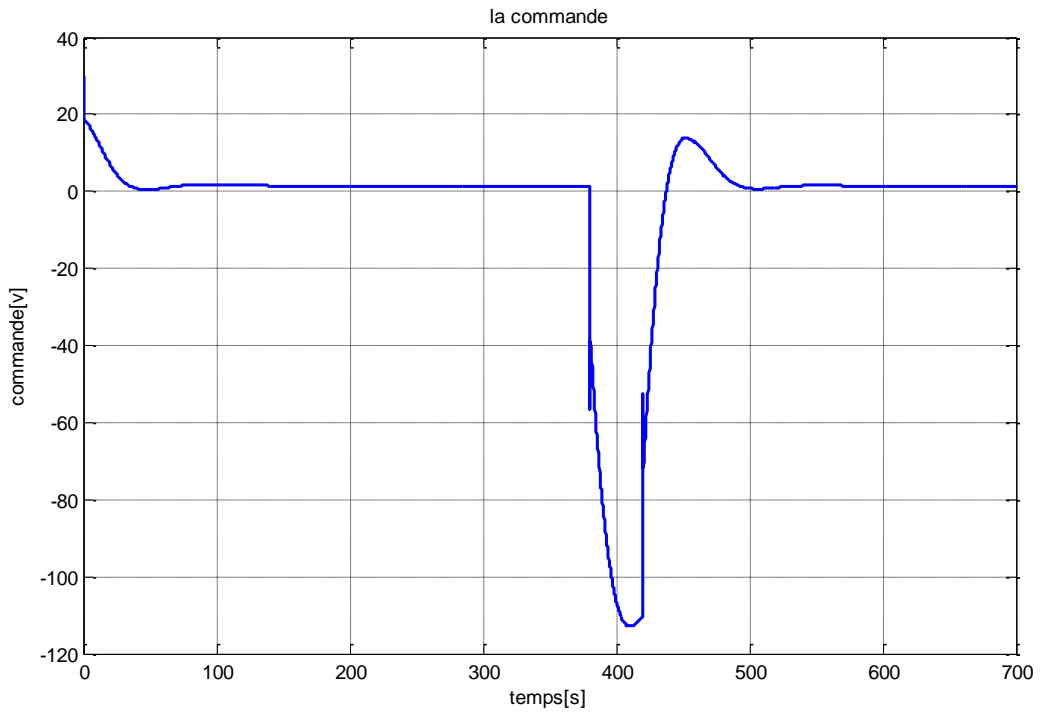
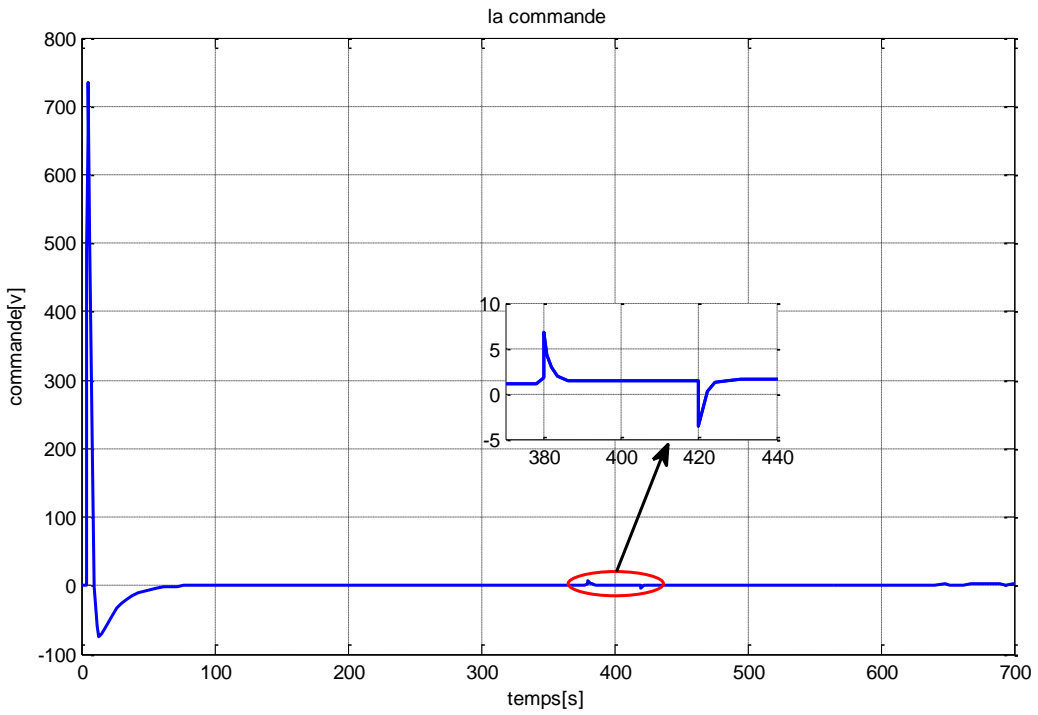
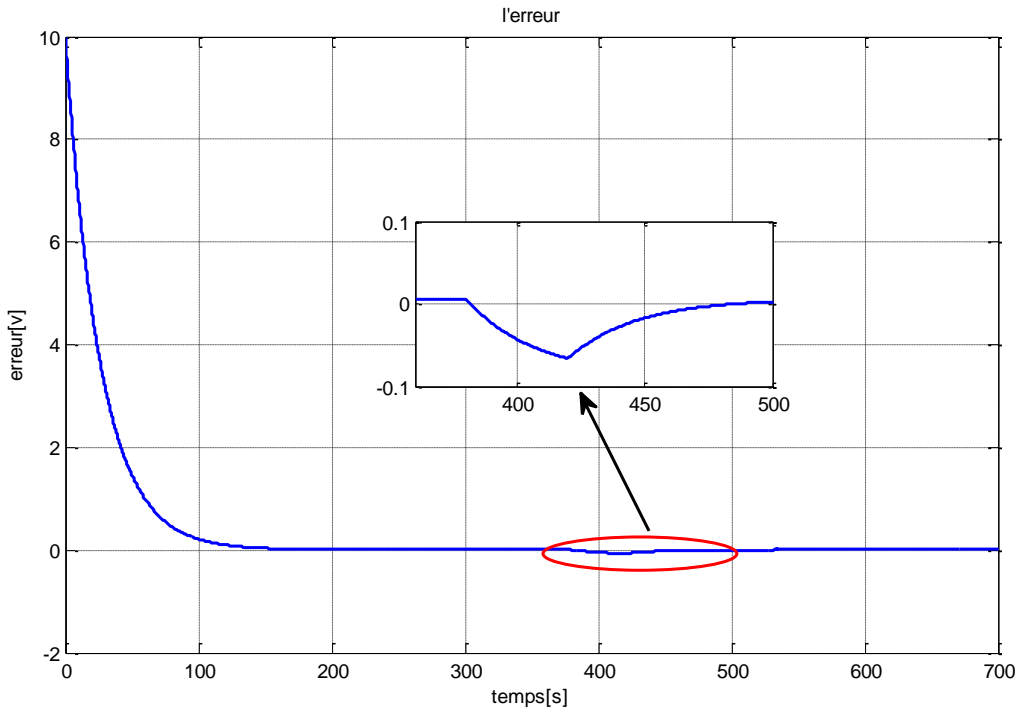


Fig. 3.16 résultats de simulation de la commande par contrôleur PID (avec défaut).

➤ Résultats de la simulation (FLC)



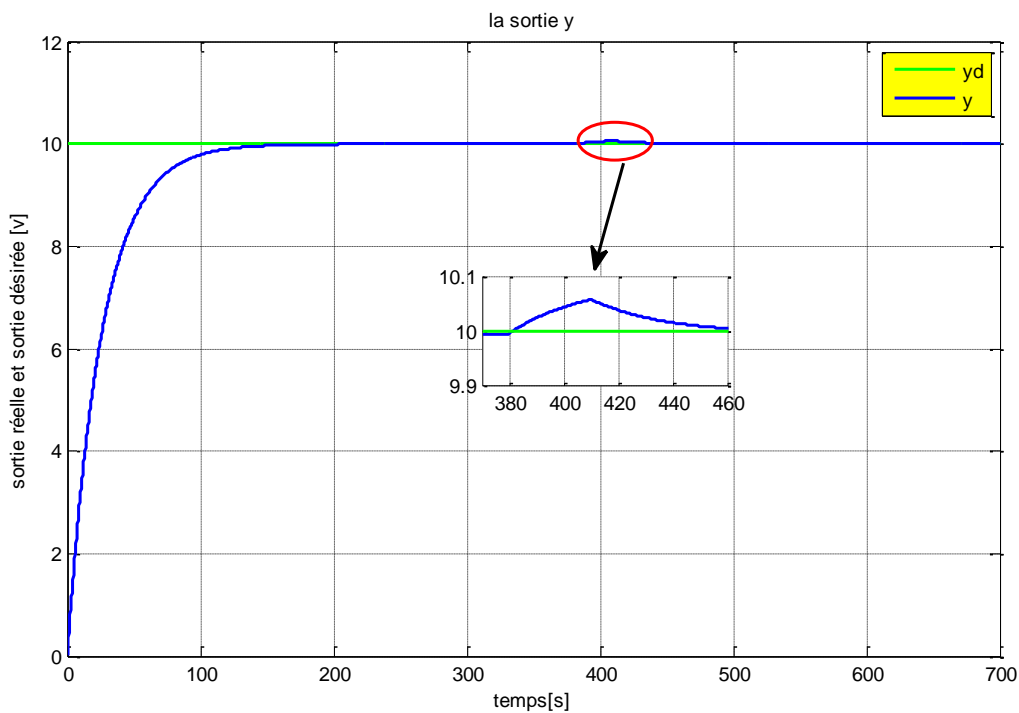


Fig. 3.17 résultats de simulation de la commande par linéarisation entrée/sortie (avec défaut).

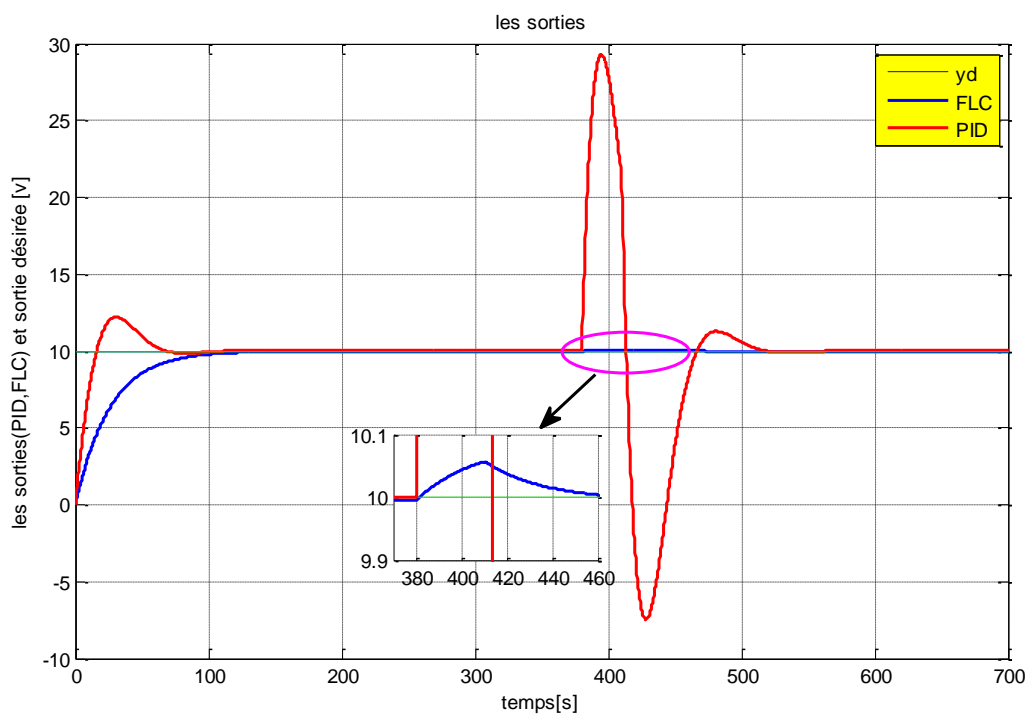


Fig. 3.18 résultats de simulation de la commande (PID et FLC) (avec défaut).

3.7 Commentaires sur les résultats

Pour qu'il avant le 380 seconde, il n'y a pas de défaut, les erreurs de régulation et de poursuite sont faibles et qu'il y a un bon suivi des trajectoires souhaitées et les signaux de commande sont relativement lisses. Après le défaut de l'actionneur entré à 380 seconde, le signal commande est divergé pour la commande PID et reste stable pour la commande FTC

Lorsque les défauts de l'actionneur surviennent, la valeur des gains diminue pour éviter le dépassement qui peut être causé par l'augmentation de la commande u . Nous pouvons conclure que l'approche de commande tolérante aux défauts proposée garantie que :

- Tous les signaux et la commande u sont globalement bornés.
- L'erreur de poursuite du système converge vers un petit voisinage de l'origine.
- Ainsi on peut dire que la commande par linéarisation entrée/sortie est tolérante aux défauts, Par rapport au régulateur PID.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, en premier temps, nous avons donné quelques notions aux principales commandes de tolérance aux défauts. C'est classé en deux approches : la commande tolérante aux défauts passive et active. Les méthodes passives sont basées sur des techniques de contrôle robustes. En revanche, les méthodes actives permettent de traiter des défauts inattendus et nécessitent une commande reconfigurable et un module de diagnostic. Par la suite Nous avons Appliquer un défaut actionneur dans la Système CE105, Lorsque les résultats de la simulation ont montré la différence de la commande tolérante aux défauts par rapport au régulateur PID, où la commande par linéarisation entrée/sortie n'affecté par le défaut par rapport à régulateur PID qui présente des oscillations a grande amplitude.



Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous sommes intéressés à la commande tolérante au défaut d'un système hydraulique à deux réservoirs basée sur la commande par retour d'état.

En premier lieu, présente les concepts de base de modélisation du système hydraulique CE105, puis nous avons appliqué au système hydraulique deux techniques de commande, en l'occurrence, la commande basée sur la linéarisation entrée/sortie, la commande par PID, et nous avons donné quelques notions aux principales commandes de tolérance aux défauts, par la suite nous avons appliqué un défaut actionneur sur le système CE105. Le but de la commande tolérante aux défauts (FTC) est de s'accommoder automatiquement de l'effet des défauts tout en étant capable de maintenir la stabilité et au mieux les performances nominales du système.

Ainsi, on peut résumer le travail effectué dans ce mémoire comme suit :

Modélisation d'un système hydraulique à deux réservoirs couplés, présenté par système hydraulique CE105. Le modèle d'état résultant est un modèle dynamique non linéaire de second ordre où les variables d'état sont les niveaux de liquide dans les deux réservoirs. La variable de sortie est le niveau d'eau dans le deuxième réservoir. La variable d'entrée de commande est la tension d'alimentation de la pompe alimentant le premier réservoir.

Dans un second temps, la commande par linéarisation dans le sens entrée/sortie est présentée. Cette approche repose sur la notion de degrés relatifs des outputs considérés. L'application de cette technologie au système hydraulique a obtenu des résultats satisfaisants. Dans notre cas, pour un système hydraulique, les résultats de simulations donnent des bonnes performances par rapport le régulateur PID.

Enfin des généralités sur la commande tolérante aux défauts a été présentée en troisième lieu. Et les notions relatives aux deux types de commande tolérante aux défauts, active et passive, puis nous avons appliqué une commande tolérante au défaut à base de la commande non linéaire par la linéarisation entrée/sortie passive avec un défaut actionneur, les résultats de simulation ont montrent une grande efficacité de l'approche FTC par rapport la commande PID la commande FTC garanti la stabilité et le suivez de poursuite de trajectoire.

Références Bibliographie

- [1] Mahir « Système hydraulique », Université Lille1 Projet IMA4
- [2] N. Layadi, A. Houari, S. Zeghlache, M. Benkhoris, A. Djerioui and F. Berrabah, Integral Backstepping Control for Double Star Induction Machine (DSIM), International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), Algiers, Algeria, 2018, pp. 1 – 6.
- [3] P. Wellstead, TecQuipment CE105 Coupled Tanks Apparatus, Control Systems Centre, Manchester, U.K, 1993.
- [4] Site web, https://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_drive_system4.
- [5] Site web, <https://elearning-deprecated.univ-annaba.dz/mod/resource/view.php?id=37884>.
- [6] Site web, https://www.wikiwand.com/fr/Techniques_arabes_au_Moyen_%C3%82ge.
- [7] Site web, http://ressources.chateauversailles.fr/IMG/pdf/le_systeme_hydraulique_chronologie_des_travaux_d_adduction.pdf.
- [8] Cite web, <https://andrenotre.com/2012/04/30/bassin-dappolon-jardins-deversailleschevaux-sous-les-grandes-eaux/>.
- [9] Site web, https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_de_Marly.
- [10] Le Roux, T. (Ed.). (2018). Risques industriels: savoirs, régulations, politiques d'assistance, fin XVIIe-début XXe siècle. Presses universitaires de Rennes.
- [11] Bali Noureddine, «Commandes prédictives appliquées au robot PUMA et au palier magnétique actif », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 15 Décembre 2007.
- [12] P. Wellstead, TecQuipment CE105 Coupled Tanks Apparatus, Control Systems Centre, Manchester, U.K, 1993.
- [13] Boubakir Ahcene, « Méthodes de commande par mode de glissement appliquées au bras manipulateur et au système hydraulique CE105 à réservoirs couplés», Mémoire de magistère, École Militaire Polytechnique, 04 / 02 / 2007.

- [14] H. Kenniche, Commande par linéarisation entrées-sorties d'une machine asynchrone avec un estimateur d'état du flux rotorique, Mémoire de master, Université Ouargla, 2015.
- [15] CHEMMOURI Boudjemaa ; GAFER Boubekour "Commande non-lineaire d'une machine synchrone a aimants permanents, " Mémoire d'Ingéniorat Université de M'SILA, 2005.
- [16] ALBERTO ISIDORI, 3RD EDITION, 2003, NONLINEAR CONTROL SYSTEMS (COMMUNICATIONS AND CONTROL ENGINEERING SERIES .
- [17] I. Boubakir, A. Zenanra, Commande décentralisée basée sur la dérivée d'ordre supérieur, PFE, Université de Jijel, 2009.
- [18] M. Achbi, "Commande tolérante aux défauts en utilisant les réseaux de neurones artificiels et les systèmes d'inférence floue", Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider Biskra ,2012.
- [19] A. Bouguerra, "Commande Tolérante aux Défauts d'un Appareil à Vol Vertical", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf De M'sila ,2015.
- [20] Nadia DJEGHALI, «Observation, Diagnostic, et Commande de la Machine Asynchrone », Thèse de Doctorat, Spécialité Automatique, UMMTO, 2013.
- [21] H.Khebbache, "Tolérance aux défauts via la méthode backstepping des systèmes non linéaires", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas De Sétif ,2012.
- [22] M. Oudghiri, "Commande multi-modèles tolérante aux défauts : Application au contrôle de la dynamique d'un véhicule automobile ", Thèse de Doctorat, L'universite De Picardie Jules Verne ,2008.
- [23] N.Belkhrichi, « Contribution à l'étude du diagnostic et de la commande tolérante aux fautes par l'approche structurelle – application aux procédés biologiques », Thèse de Doctorat, L'université De Toulouse, 2011.
- [24] Fateh GUENAB, « Contribution aux systèmes tolérants aux défauts: Synthèse d'une méthode de reconfiguration et/ou de restructuration intégrant la faisabilité des composants », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, Spécialité Automatique, 2007.

Commande tolérante au défaut non linéaire par linéarisation entrée – sortie d'un système hydraulique à deux réservoirs

Résumé : L'objectif de ce travail est la mise en œuvre d'une commande tolérante aux défauts d'un système hydraulique à deux réservoirs basée sur la commande non linéaire par linéarisation E/S, et découvrez qui il cette approche préserve les performances du système et garantit la stabilité et la poursuite dans le cas de défaut d'actionneur. Notre étude est portée sur deux commande, le premier est le régulateur PID en raison de leur simplicité de la structure. La deuxième technique est la commande FTC non linéaire par linéarisation E/S. Les lois de commande développées, ont été validées par des simulations avec MATLAB/SIMULINK appliqué sur le modèle d'un système hydraulique CE105 à réservoirs couplés.

Mots Clés : Commande tolérante aux défauts, système hydraulique CE105, régulateur PID, commande FTC, linéarisation entrées-sorties.

التحكم غير الخطي المتسامح مع الخطأ عن طريق إدخال خطي الإدخال والإخراج لنظام هيدروليكي ثنائي الخزان

ملخص: الهدف من هذا العمل هو تنفيذ التحكم غير الخطي المتسامح مع الخطأ عن طريق إدخال خطي الإدخال والإخراج لنظام هيدروليكي ثنائي الخزان، ومعرفة النهج الذي يحافظ على أداء النظام ويضمن الاستقرار والاستمرارية في حالة حدوث عطل في المحرك. تركز دراستنا على أمرين للتحكم في هذا النظام، الأول هو وحدة تحكم PID نظرًا لبساطة هيكلها. التقنية الثانية هي عن طريق خطية المدخلات والمخرجات. تم التحقق من صحة قوانين التحكم التي تم تطويرها من خلال المحاكاة على النظام الهيدروليكي CE105 مع الخزانات المقترنة، وتم التحقق من صحة تقنية التحكم في تحمل الأخطاء المقترحة عن طريق المحاكاة.

الكلمات المفتاحية: التحكم المتحمل للخلل، النظام الهيدروليكي CE105، وحدة تحكم PID، تحكم متسامح مع الخطأ، خطية المدخلات والمخرجات.

Non-linear fault-tolerant control by feedback linearization of a two-tank hydraulic system

Abstract: The objective of this work is the implementation of a fault-tolerant control of a two-tank hydraulic system based on the nonlinear control by I/O linearization, and find out which it this approach preserves the performance of the system and guarantees stability and tracking in the event of an actuator fault. Our study is focused on two controls, the first is the PID controller because of their simplicity of structure. The second technique is nonlinear FTC control by I/O linearization. The control laws developed were validated by simulations with MATLAB/SIMULINK applied to the model of a CE105 hydraulic system with coupled reservoirs.

Key words: Fault Tolerant Control, the CE105 hydraulic system, the PID controller, FTC controller, feedback linearization.