

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

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIES
FILLIAIRE : AUTOMATIQUE
OPTION : AUTOMATIQUE ET SYSTEMES

N°

**Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme
de Master Académique Par :**

BEN GANA NABIL

CHARIF AHMED

**Intitulé : Diagnostic et commande tolérante aux défauts d'un système
hydraulique à quatre réservoirs**

Membres du jury :

Nom et prénom de l'enseignant	Grade	
BEDBOUDI Mohamed	MCB	Président
OUBABAS Hocine	MCB	Rapporteur
ROUBACHE Toufik	Professeur	Examineur

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

شكر:

الحمد لله الذي تتم بنعمته الصالحات.

نتقدم بالشكر الجزيل للأستاذ الدكتور أوباباس حسين المشرف على انجاز هذه
المذكرة على اهتمامه و متابعته للعمل في جميع مراحلها و على حرصه على
إخراجه على الوجه الأكمل فجزاه الله خيرا.

وايضا السادة الأساتذة أعضاء اللجنة على قبولهم الإطلاع على هذه المذكرة
و على المشاركة في تقييمها.

شكرا لكل من يساهم بتوفير مادة علمية أو نشر خبرة أو مهارة.

Dédicaces

بسم الله والحمد لله
والصلاة والسلام على رسول الله

إهداء:

إلى من لا يضاھيھما أحد في الكون، إلى من أمرنا الله ببرّھما، إلى من بذل
الكثير، وقدّم ما لا يمكن أن يردّ، إليكما تلك الكلمات والدينا الغاليان، نھدي لكم
هذا البحث؛ فقد كنتم خير داعم لنا طوال مسيرتنا الدراسية

إلى اولئك الذين سمو احلامهم على جدران الجامعات،

وحملو دفاترهم في طريقهم الى الشهادة..

إلى طلبة غزة الجامعيين الذين رحلوا قبل ان تكتمل الحكاية..

قبل ان ينادى اسمائهم يوم التخرج، فصاروا نورا لا ينطفئ في سماء العلم
والكرامة.

سلاما على ارواحكم الطاهرة، وموعدا عند رب لا ينسى

Table des matières

Table des matières.....	i
Liste des Figures.....	iii
Liste des Tableaux.....	iv
Abréviation	v
Symboles	vi
Introduction générale	Error! Bookmark not defined.
Chapitre I :Diagnostic et commande tolérante aux défautes : état de l’art et généralités	
I.1 Introduction.....	10
I.2 Définitions et concepts :.....	10
I.3 Classification des défauts	11
I.3.1 Défauts actionneurs :.....	12
I.3.2 Défauts capteurs :.....	12
I.3.3 Défauts systèmes ou composants :.....	12
I.4 Méthodes de diagnostic :	13
I.4.1 Méthodes sans modèle mathématique :.....	13
I.4.2 Méthodes de diagnostic à base de modèle :.....	15
I.5 Principe de Génération de résidus.....	17
I.5.1 Principe de génération de résidus à base d’observateurs	18
I.5.2 Evaluation des résidus générés à base d’observateur :.....	19
I.6 Les systèmes tolérants aux défauts :.....	21
I.6.1 Objectifs de la commande tolérante aux défauts.....	21
I.6.2 Classification des approches de la commande tolérante aux défauts.....	22
I.6.2.1 Approche Passive :.....	23
I.6.2.2 Approches actives :	23
I.7 Conclusion :	29
Chapitre II :Modélisation et commande d’un système hydraulique à quatre réservoirs	
II.1 Introduction :	31
II.2 Description du système quatre réservoirs :	31
II.2.1 Modèle mathématique.....	32
II.2.2 Le modèle non linéaire.....	32
II.3 Modèle linéarisé	34
II.4 Partie simulation :.....	37
II.4.1 Cas non linéaire :.....	37
II.4.2 Cas linéaire :	37
II.4.2.1 Système en boucle ouverte sans perturbation	37
II.4.2.2 Système en boucle ouverte avec perturbation.....	39
II.4.2.3 Système en boucle fermée avec contrôle PID en absence de perturbations.....	40
II.4.2.4 Système en boucle fermée avec contrôle PID en présence de perturbations	41
II.5 Conclusion	42

Chapitre III. Diagnostic est commande tolérante aux défauts du système à quatre réservoir

III.1 Introduction	44
III.2 Construction de l'observateur à entrée inconnue	45
III.2.1 Construction de l'observateur à entrée inconnue en absence de défauts	45
III.2.2 Simulation de l'observateur en absence de défauts.....	48
III.3 Construction du banc d'observateur pour localisation de défauts actionneurs .	49
III.3.1 Résultats de simulation	50
III.4 Détection et localisation de défauts actionneurs	50
III.4.1 Construction de l'observateur à entrée inconnue en présence de défauts	51
III.4.2 Résultats de simulation	53
III.4.3 Compensation de défaut de type actionneur	54
III.4.4 Résultats de simulation	55
III.4.4.1 Interprétation générale :	56
III.5 Conclusion	56
Conclusion générale	58
Résumé	59
Références bibliographiques	Ixii

Liste des Figures

Figure I.1- Types de défauts.....	12
Figure I.2 - Classification générale des méthodes de diagnostic.....	13
Figure I.3- Principe de diagnostic avec modèle.....	16
Figure I.4- Structure d'un générateur de résidus.....	17
Figure I.5- Schéma de principe du diagnostic des défauts à base d'observateurs.....	19
Figure I.6- Structure d'observateur simplifié.....	20
Figure I.7 -Structure d'observateurs dédiés.....	20
Figure I.8 - Structure d'observateurs généralisés.....	21
Figure I.9- Structure générale d'un système tolérant aux défauts.....	22
Figure I.10- Classification des approches de la commande tolérante aux défauts.....	23
Figure I.11- Principe d'un système de commande active tolérante aux fautes.....	24
Figure I.12 Principe de la méthode PIM :.....	25
Figure I.13- Principe général d'un système de commande adaptative.....	26
Figure I.14- Principe de la Commande LQ.....	27
Figure I.15- Principe de la commande multi-régulateurs.....	28
Figure II.1- Schéma du système à quatre réservoirs.....	31
Figure II.2- Schéma d'un réservoir unique.....	33
Figure II.3- Évolution des hauteurs des réservoirs dans le cas non linéaire.....	37
Figure II.4- Schéma de simulation du système à quatre réservoirs sans perturbation.....	38
Figure II.5 -Réponse temporelle du système en boucle ouverte sans perturbation.....	38
Figure II.6- Schéma de simulation du système en boucle ouverte avec perturbation.....	39
Figure II.7- Réponse temporelle du système en boucle ouverte avec perturbation appliquée.....	39
Figure II.8-Schéma de simulation du système à quatre réservoirs commandé par PID , en absence de perturbations.....	40
Figure II.9- Réponse du système en boucle fermée avec PID.....	41
Figure II.10- Schéma d'un système en boucle fermée avec régulateur PID et en présence de perturbations.....	41
Figure II.11- Réponse des réservoirs avec PID en présence d'une perturbation.....	42
Figure III.1– Schéma de simulation du système sans défauts.....	48
Figure III.2– l'évolution d'état d'observateur et la sortie du système.....	48
Figure III.3– Les résidus en absence de défauts.....	49
Figure III.4 – L'erreur d'estimation.....	49
Figure III.5– Evolution des résidus en absence de défauts.....	50
Figure III.6– Structure d'observateurs généralisée (GOS).....	50
Figure III.7– Les défauts actionneur.....	53
Figure III.8– Evolution des résidus en présence de défauts.....	54
Figure III.9– l'effet de la reconfiguration sur le système soumis aux défauts.....	55

Liste des Tableaux

Tableau II.1 – Réglage des vannes.	35
Tableau II.2 – Paramètres du processus.....	36
Tableau II.3 – Points de fonctionnement	36
Tableau II.4 – Paramètres des régulateurs P, PI et PID obtenus à partir d'une réponse indicielle en boucle fermée	40

Abréviation

FTCS	Fault tolerant control system
FTA	Fault Tree analysis
FDD	Fault Detection and Diagnostics
AFTC	Active Fault tolerant control
GOS	Generalized Observer Scheme
DOS	Dedicated Observer Scheme

Symboles

A	Matrice de transition
B	Matrice de commande
D	Matrice de transmission directe
$e(t)$	erreur d'estimation d'état
\mathbf{R}	Ensemble des nombres réels
t	Variable de temps
I	Matrice identité
$f(t)$	Vecteur de défaut
L	Matrice du gain de l'observateur de Luenberger
$r(t)$	vecteur de résidus
$R(s)$	Résidu du système t temps
$u(t)$	Commande du système

Introduction générale

L'évolution et le développement croissant des processus de production conduit à la mise en place de systèmes de plus en plus complexes, utilisant de nouvelles technologies permettant d'accroître la qualité des produits et la productivité des systèmes. Cependant, ces évolutions rendent les systèmes plus vulnérables aux défauts. Dans le but d'assurer la disponibilité, la fiabilité, la maintenabilité et la sûreté de fonctionnement des systèmes, le problème de la commande en présence de défauts a été largement traité dans la littérature [1], [2], et [3]. La majeure partie des recherches a été consacrée au problème de la détection et de la localisation de défauts de manière à déterminer l'état de fonctionnement du système (normal ou défaillant). Plusieurs approches et méthodes sont utilisées pour résoudre ce problème.

Il existe une multitude de méthodes de diagnostic. Elles sont classées de différentes façons. Une de ces classifications consiste à regrouper les méthodes de diagnostic en deux grandes familles : les méthodes à base de modèles mathématiques et les méthodes sans modèle. Les méthodes de diagnostic basées sur les modèles mathématiques se reposent généralement sur le principe de génération des résidus. Pour obtenir les expressions analytiques des résidus, plusieurs techniques peuvent être utilisées. Nous trouvons principalement celles utilisant l'espace de parité, l'estimation paramétrique ou les observateurs d'état. Les méthodes de diagnostic à base d'observateurs ont reçu une attention particulière de la communauté scientifique à cause de leur efficacité.

Sous l'hypothèse d'un bloc de diagnostic fournissant les informations liées à la détection et à la localisation de défauts, il est possible soit de compenser l'effet du défaut (accommodation) soit de modifier les lois de commande de manière à amener le système dans un état le plus proche possible de celui dans lequel il se trouvait en fonctionnement normal (reconfiguration). Ces procédures à mettre en œuvre lors de l'occurrence de défauts ont été développées sous forme de plusieurs stratégies définies sous l'expression des systèmes tolérants aux défauts ou FTCS (fault tolerant control system). L'étude consacrée aux systèmes tolérants aux défauts remonte au début des années 80, sous des terminologies variées telles que les systèmes reconfigurables, restructurables ou auto-réparés.

Les méthodes de commande tolérantes aux défauts à base de modèles occupent une place importante dans la littérature. Leur utilisation, notamment dans le cadre d'applications

critiques (systèmes énergétiques, systèmes de transport, industrie lourde,), s'est considérablement développée.

L'objectif de ce travail de mémoire est de synthétiser une loi de commande tolérante aux défauts, afin d'effectuer une accommodation de défauts et/ou une reconfiguration du régulateur. Les systèmes tolérants aux défauts résultants permettent d'accroître la sécurité et la disponibilité des outils de production. Pour générer des systèmes tolérants aux défauts en synthétise à la fois des modules de diagnostic ainsi qu'un mécanisme de reconfiguration lors de la perte d'actionneurs prenant en considération l'information du module de diagnostic. Cette vue globale du problème d'automatique pour la mise en œuvre de systèmes tolérants aux défauts nous a amené à étudier à la fois des méthodes pour le diagnostic ainsi que des méthodes de commande tolérante aux défauts.

Ce mémoire comporte 3 chapitres articulés comme suit :

Chapitre 1 : Ce chapitre présente les différents concepts de diagnostic et les principales stratégies de commande tolérante aux défauts. Il permet notamment de classer diverses méthodes de diagnostic en deux grandes catégories: les méthodes à base de modèle et les méthodes sans modèle. les lois de commandes tolérantes sont à leur part classées en deux approches : les lois de commande tolérantes aux défauts passives d'une part, et actives d'autre part.

Chapitre 2 : Ce chapitre présente la modélisation et la commande du système à quatre réservoirs. Une description bien détaillée du système est donnée, un correcteur PID est synthétisé pour améliorer les performances du système.

Chapitre 3 : Ce chapitre est dévolu à l'élaboration d'observateurs à entrées inconnues (UIO) pour le diagnostic du système à quatre réservoirs. Les UIO permettent de rejeter des informations non désirables (erreurs de modélisation modélisées comme des entrées inconnues) tout en conservant leur capacité de générer des résidus sensibles aux défauts. La stratégie de commande tolérante aux défauts, reposant sur la mise en œuvre d'une action de reconfiguration est appliquée à cet exemple en considérant le cas de défauts actionneurs.

Enfin, Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui réuni les différents résultats obtenus et qui ouvre des nouvelles perspectives pour d'autres travaux.

**Chapitre I. Diagnostic et commande tolérante aux
défauts : état de l'art et généralités**

Chapitre I.: Diagnostic et commande tolérante aux fautes : état de l'art et généralités

I.1 Introduction

Dans un contexte industriel de plus en plus complexe et interconnecté, la fiabilité et la sûreté de fonctionnement des systèmes sont devenues des préoccupations majeures. Les défauts ou défaillances dans les systèmes peuvent entraîner des conséquences graves, allant de simples perturbations opérationnelles à des accidents catastrophiques, avec des impacts humains, économiques et environnementaux considérables. Pour répondre à ces défis, le diagnostic et la commande tolérante aux défauts (Fault-Tolerant Control, FTC) se sont imposés comme des domaines clés de la recherche scientifique et de l'ingénierie.

Le diagnostic des systèmes consiste à détecter, isoler et identifier les défaillances qui surviennent dans un système dynamique. Cette étape est cruciale pour garantir une prise de décision rapide et efficace afin de minimiser les risques liés à une panne. Une fois un défaut détecté, la commande tolérante aux fautes intervient pour maintenir, autant que possible, les performances du système malgré la présence de la défaillance. Ces deux disciplines, bien qu'étroitement liées, reposent sur des principes théoriques et méthodologiques distincts mais complémentaires.

Ce chapitre vise à fournir un état de l'art détaillé sur les concepts fondamentaux, les approches et les outils utilisés dans le domaine du diagnostic et de la commande tolérante aux fautes. Nous commencerons par présenter les notions de base liées aux défauts, à leur modélisation et aux différentes stratégies de diagnostic. Ensuite, nous explorerons les principes sous-jacents de la commande tolérante aux fautes

I.2 Définitions et concepts : [4]

Une panne : est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance.

Un défaut : est une anomalie de comportement au sein du système. Ce concept est important dans les opérations de surveillance pour la conduite et la maintenance des processus industriels. Tout écart entre la caractéristique observée et la caractéristique de référence est considéré comme étant un défaut.

Une défaillance : est une anomalie altérante ou empêchant l'aptitude d'une unité fonctionnelle à accomplir la fonction souhaitée. Une défaillance correspond à un passage d'un état à un autre, par opposition à une panne qui est un état. Par abus de langage, cet état de panne on pourra l'appeler mode de défaillance.

Une perturbation : consiste en tout phénomène conçu comme normal influençant un processus, non ou mal, représenté par un modèle de référence.

Un résidu : est un signal conçu pour être un indicateur d'anomalies fonctionnelles ou comportementales, sensiblement nul en absence de défauts et non nul en leur présence.

Un symptôme : est un caractère distinctif d'un état fonctionnel ou comportemental anormal.

Le diagnostic : consiste à déterminer le type, la taille, le lieu et l'instant d'occurrence d'un défaut, il suit la détection de défauts et inclut l'isolation et l'identification.

La surveillance : est une tâche continue, réalisée en temps réel, qui permet de déterminer l'état d'un système physique, elle consiste en l'enregistrement des informations ainsi qu'en la reconnaissance et l'indication des anomalies du comportement.

La sensibilité : représente la capacité d'un système de diagnostic à générer des résidus sensibles aux défauts à détecter. Ces défauts sont généralement caractérisés par une certaine amplitude.

La supervision : est la surveillance d'un système physique et la prise de décisions appropriées en vue de maintenir son opération lors de l'apparition de défauts.

I.3 Classification des défauts

Les défauts sont des événements qui apparaissent à différents endroits du système. Dans la littérature, les défauts sont classés en fonction de leur location, définissant alors des types de défauts.

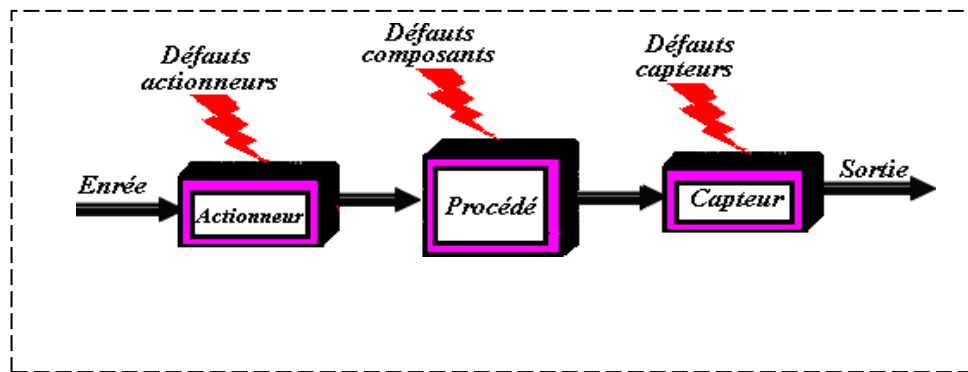


Figure I.1- Types de défauts [5]

I.3.1 Défauts actionneurs :

Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative du système de commande et détruisent le signal d'entrée (conduisent à une perte partielle ou totale le signal d'entrée). Une partie du système devient non commandable et de nouveaux Actionneurs doivent être utilisés. Ces défauts peuvent causer une perte totale ou partielle de l'actionneur. Une perte totale d'un actionneur peut se produire, par exemple, à la suite d'une fracture ou coupure d'un fil électrique reliant l'actionneur au système. Un exemple de perte partielle d'un actionneur est la fuite hydraulique ou pneumatique ou encore la chute de la tension d'alimentation.[6]

I.3.2 Défauts capteurs :

Ce type de défauts est la cause d'une mauvaise image de l'état physique du système. Un défaut capteur partiel produit un signal avec plus au moins d'adéquation avec la valeur vraie de la variable à mesurer. Ceci peut se traduire par une réduction de la valeur affichée par rapport à la valeur vraie, ou de la présence d'un biais ou de bruit accru empêchant une bonne lecture. Un défaut capteur totale produit une valeur qui n'est pas en rapport avec la grandeur à mesurer. [5]

I.3.3 Défauts systèmes ou composants :

Ce sont des défauts qui apparaissent dans les composants du système lui-même, c'est-à-dire les défauts qui ne peuvent être classifiés 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. [5]

I.4 Méthodes de diagnostic :

Les méthodes de diagnostic de défaillances et de dégradations utilisées dans les différents secteurs industriels sont très variées, elles correspondent à la diversité des problèmes rencontrés. Il est possible de les classer selon le schéma de la figure (I.2)

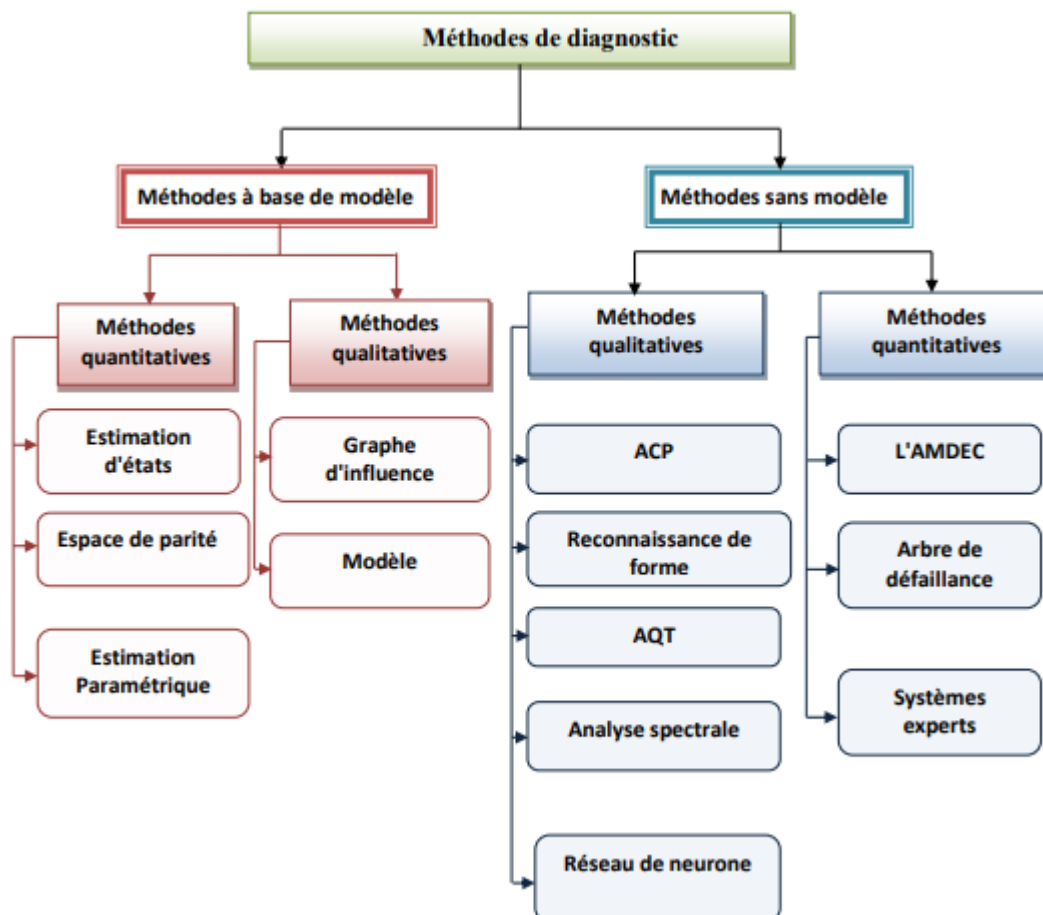


Figure I.2 - Classification générale des méthodes de diagnostic. [7]

I.4.1 Méthodes sans modèle mathématique :

Les méthodes sans modèle mathématique désignent des techniques qui n'exigent pas la connaissance a priori d'une relation mathématique entre les variables du système étudié. Elles s'appuient principalement sur des algorithmes d'apprentissage supervisé ou non supervisé, des simulations basées sur des données expérimentales, ou des approches heuristiques pour extraire des informations utiles. Ces méthodes sont particulièrement adaptées lorsque le système est complexe, mal compris ou difficile à modéliser analytiquement.[8]

A. Méthodes quantitatives

L'AMDEC :

L'AMDEC (Analyse Mode Défaillance et Effets Critiques) est une méthode systématique et proactive de diagnostic qui vise à identifier, analyser et évaluer les modes de défaillance potentiels d'un système, ainsi que leurs effets sur la performance globale. Elle permet de classer les défaillances en fonction de leur criticité et de proposer des actions correctives pour réduire les risques associés.

Arbre de Défaillance (Fault Tree Analysis - FTA) [9]

L'Arbre de Défaillance (FTA) est une méthode graphique et logique utilisée pour analyser les causes potentielles d'une défaillance spécifique dans un système. Elle représente les relations entre les événements sous forme d'un arbre logique où le nœud racine correspond à la défaillance finale, et les branches représentent les événements contributifs ou causes.

Systèmes Experts : [10]

Les Systèmes Experts sont des systèmes informatiques basés sur des règles ou des connaissances expertes qui simulent le raisonnement humain pour résoudre des problèmes complexes, notamment dans le domaine du diagnostic de fautes. Ils utilisent une base de connaissances et un moteur d'inférence pour interpréter les symptômes observés et proposer des diagnostics.

B-méthodes qualitatives :

ACP (Analyse en Composantes Principales) : [11]

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode statistique utilisée pour réduire la dimensionnalité des données tout en conservant la plus grande quantité possible d'information. Elle transforme un grand nombre de variables corrélées en un petit nombre de composantes principales indépendantes, facilitant ainsi l'analyse et la visualisation des données. L'ACP est couramment utilisée pour détecter des structures cachées dans les données et identifier des anomalies ou des tendances.

Reconnaissance de forme : [12]

La reconnaissance de forme est une méthode qualitative utilisée pour identifier et classifier des objets ou des motifs dans des données complexes. Elle repose sur l'analyse de caractéristiques spécifiques telles que la géométrie, la texture, ou la couleur pour distinguer différents types de formes. Cette technique est souvent utilisée en vision par ordinateur, en traitement d'image et dans divers domaines industriels pour détecter des anomalies ou des patterns particuliers.

Réseaux de neurones : [13]

Les réseaux de neurones sont des systèmes informatiques inspirés du fonctionnement du cerveau humain. Ils consistent en un ensemble de nœuds interconnectés (neurones artificiels) qui apprennent à reconnaître des patterns dans les données en ajustant les poids des connexions entre ces neurones. Les réseaux de neurones sont largement utilisés dans le diagnostic pour détecter des anomalies, prédire des événements ou classifier des données sans nécessiter un modèle explicite.

L'analyse spectrale : [14]

L'analyse spectrale est une méthode utilisée pour étudier les propriétés fréquentielles d'un signal ou d'une série temporelle. Elle consiste à décomposer un signal dans le domaine fréquentiel afin d'identifier ses composantes périodiques, ses fréquences dominantes et ses caractéristiques spectrales. Cette technique permet de révéler des informations cachées dans le domaine temporel qui ne sont pas immédiatement visibles.

I.4.2 Méthodes de diagnostic à base de modèle :

Le principe de ces méthodes consiste à comparer le comportement du système avec le comportement du modèle qualitatif et/ou quantitatif établi. Tout écart est alors synonyme d'une défaillance, comme indiqué dans le schéma de la figure I.8. Il est nécessaire donc d'avoir des connaissances approfondies sur le procédé à diagnostiquer sous la forme d'un modèle représentatif, qui fournit des grandeurs caractéristiques du procédé qui seront constamment comparées aux grandeurs issues du procédé réel. Selon le type du modèle (qualitatif et/ou quantitatif), on peut distinguer deux branches de méthodes : les méthodes quantitatives issues de la communauté FDI (Fault Detection and Isolation) et les méthodes qualitatives issues des communautés intelligence artificielle. La dissociation entre

les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives n'impliquent pas que ces deux aspects sont disjoints. En réalité, ces deux types d'approche peuvent coexister au sein d'une même méthode de diagnostic [15].

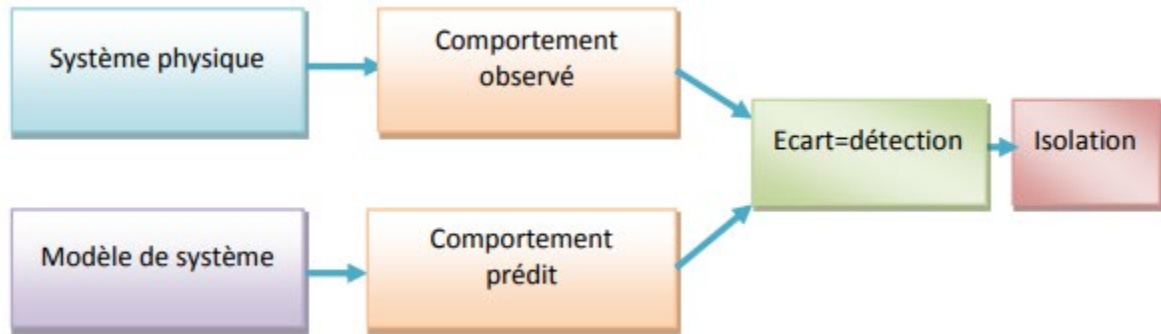


Figure I.3- Principe de diagnostic avec modèle [7]

A. Méthodes quantitatives

Graphe d'une influence : [16]

Un **graphe d'influence** est un outil graphique utilisé pour représenter les relations causales entre différentes variables dans un système. Il permet de modéliser les interactions entre les entrées, les sorties et les paramètres internes d'un système sous forme de nœuds (variables) et d'arcs (relations). Les graphes d'influence facilitent l'analyse qualitative des comportements du système et l'identification des causes probables d'une panne ou d'une anomalie.

B-méthodes qualitatives :

Estimation d'état : [17]

L'estimation d'état est une technique utilisée pour déterminer l'état interne d'un système dynamique à partir des mesures disponibles. Elle repose sur un modèle mathématique du système et utilise des algorithmes tels que le filtre de Kalman pour prédire et corriger l'état estimé en fonction des observations.

Espace parité: [11]

La méthode de l'espace parité est une approche utilisée pour détecter et isoler les pannes dans un système. Elle consiste à générer des relations linéaires (appelées "équations de parité") entre les variables mesurées et calculées. Une déviation significative entre ces relations indique la présence d'une panne.

Estimation paramétrique :[18]

L'**estimation paramétrique** est une technique utilisée pour identifier les paramètres inconnus d'un système à partir des données mesurées. Cette méthode repose sur un modèle mathématique du système et cherche à ajuster les paramètres pour minimiser l'écart entre les prédictions du modèle et les observations réelles.

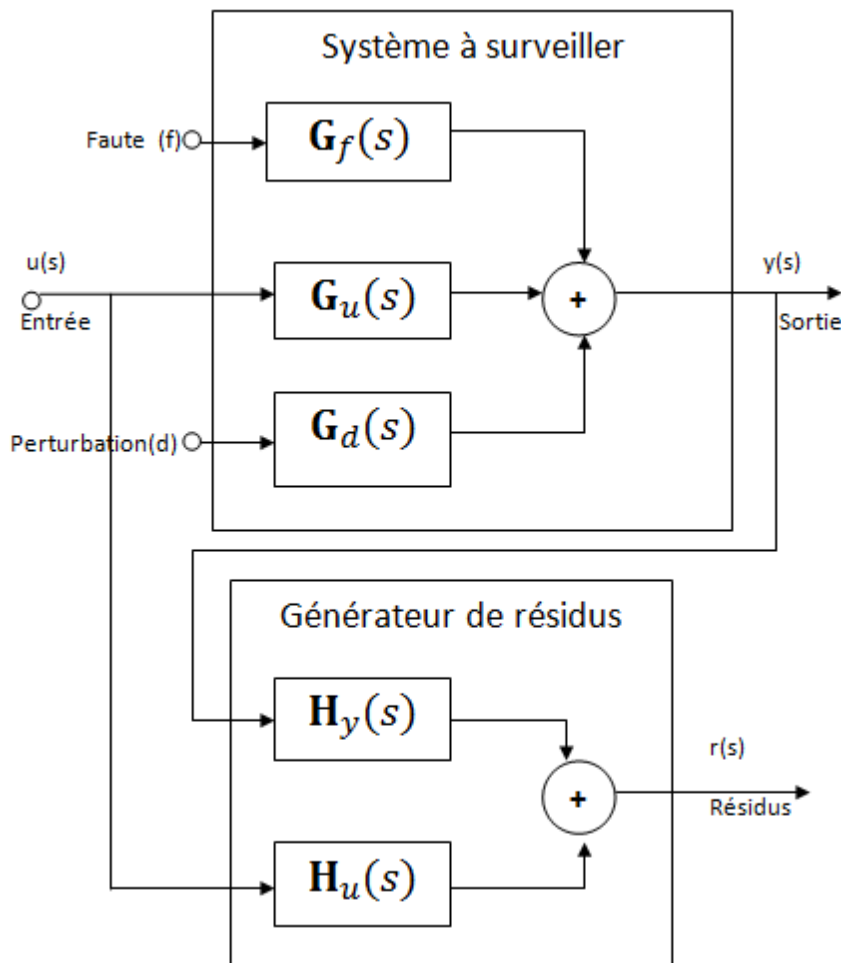
I.5 Principe de Génération de résidus

Figure I.4- Structure d'un générateur de résidus.[19]

Le rôle d'un générateur de résidus est de générer des signaux (résidus) qui ne sont sensibles qu'aux fautes.

$$\text{Tant qu'il n'y a pas de défauts : } r(s) = 0 \quad (1.0)$$

et dès qu'il y'a un défaut on aura un signal généré sur le résidu.

Tel que

$$r(s) = H_y(s)y(s) + H_u(s)u(s) \quad (1.1)$$

$$y(s) = G_u(s)u(s) + G_f(s)f(s)G_d(s)d(s) \quad (1.2)$$

On remplace (1.2) dans (1.1) on aura:

$$r(s) = H_u(s) \cdot u(s) + H_y(s) \cdot (G_u(s) \cdot u(s) + G_f(s) \cdot f(s) + G_d(s)d(s)) \quad (1.3)$$

H_u et H_y doivent satisfaire les deux relations suivantes :

$$\begin{cases} H_y(s) \cdot G_d(s) = 0 \\ H_y(s) \cdot G_u(s) + H_u(s) = 0 \end{cases} \quad (1.4)$$

Si les deux relations sont vérifiées alors :

$$r(s) = H_y(s) \cdot G_f(s) \cdot f(s) \quad (1.5)$$

$$T(s) = H_y(s) \cdot G_f(s) \quad (1.6)$$

Donc :

$$r(s) = T(s) \cdot f(s) \quad (1.7)$$

$T(s)$ est la matrice de transfert de défaut aux résidus, cette matrice de transfert est localisante car elle permet non seulement de détecter les défauts mais aussi de nous renseigner sur leur localisation, en nous fournissant une table logique de signatures.

I.5.1 Principe de génération de résidus à base d'observateurs

Le principe de génération de résidu à base d'observateur consiste à estimer une partie ou l'ensemble des grandeurs mesurables du système à surveiller. Le résidu est calculé alors en faisant la différence, éventuellement filtrée, entre les sorties réelles et celles estimées. L'observateur revient alors à un modèle parallèle au système avec une contre réaction qui pondère l'écart de sortie. Ce principe est illustré sur la Figure I.4 Cette approche offre des propriétés très intéressantes car elle donne lieu à des résidus très flexibles et la souplesse, dans le choix des paramètres, permet de s'affranchir de certaines entrées inconnues, améliorant ainsi les caractéristiques des résidus telles que leur robustesse vis à vis des perturbations et leur sensibilité aux défauts. [20]

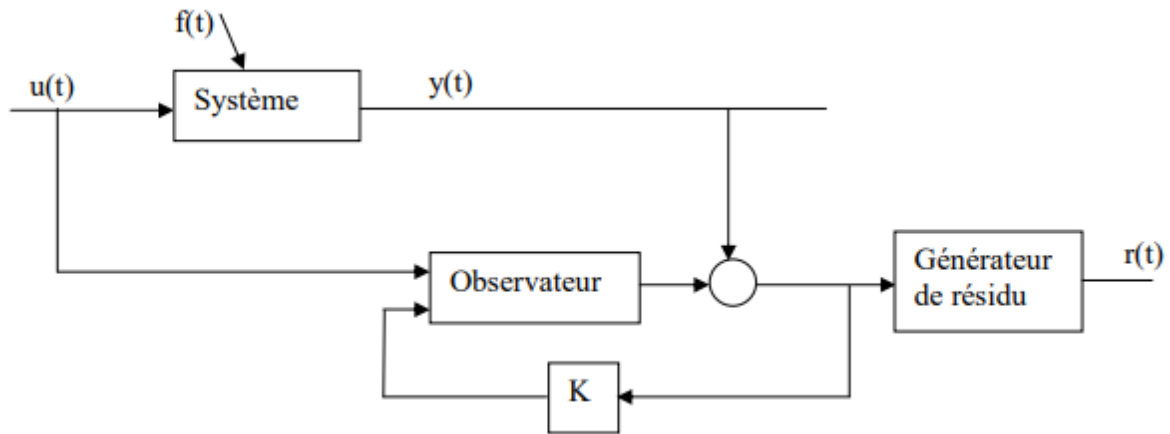


Figure I.5- Schéma de principe du diagnostic des défauts à base d'observateurs.[21]

I.5.2 Evaluation des résidus générés à base d'observateur :

Il est important d'obtenir une structure du résidu permettant son évaluation. Les résidus doivent être produits, de manière que pour chaque défaut un ou un ensemble de résidus soient affectés.

Cependant, même si l'apparition de défauts multiples est peu probable, les résidus doivent être capables de situer chacun des défauts arrivant simultanément, en occurrence, il devrait être garanti que le recouvrement des effets résultants de la combinaison des défauts ne mène pas à une décision fautive, par exemple détection manquée d'un défaut ou mauvaise isolation du défaut. Il existe plusieurs manières de définir les résidus structurés afin de parvenir à une évaluation correcte du résidu. Les résidus structurés sont conçus de manière à être chacun affecté par un sous ensemble de défaut et robuste (non affecté) par rapport aux défauts restantes. Ainsi, lorsqu'une défaillance apparaît, seul un sous ensemble de résidus réagit.

Le résidu est dit structuré par rapport à un vecteur de défaillances f_l s'il n'est affecté que par les défaillances f_l et s'il est robuste aux autres. Dans la littérature, on distingue trois structures de génération de résidus à base d'observateur ou chacune est définie par un schéma particulier.[22]

A-Structure d'observateurs simplifiés :[23]

Dans cette structure (figure I.6), le banc est constitué d'un seul observateur. Il est synthétisé de façon à n'être sensible qu'à un groupe de défauts. Dans le cas où un des défauts auquel il est sensible apparaît alors les estimations seront faussées. Dans le cas contraire, elles seront exactes.

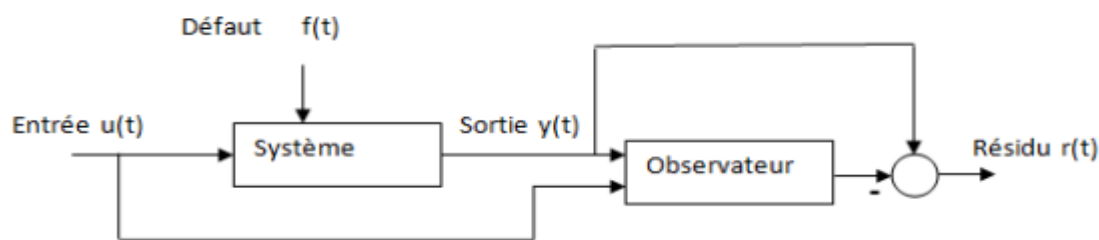


Figure I.6- Structure d'observateur simplifié [23]

B- Structure d'observateurs dédiés (DOS) :[23]

Dans ce type de structure (figure 1.7), il est question de construire autant d'observateurs que de défauts à détecter, chacun d'entre eux génère un résidu insensible à tous les défauts sauf un. Ainsi, l'observateur recevant une mesure défaillante fournit une mauvaise estimation des variables estimées, tandis que les estimations des autres observateurs convergent vers les mesures des sorties correspondantes sauf sur la sortie erronée. Cette structure reste valable même dans le cas de plusieurs défauts simultanés. Le i ème observateur est piloté uniquement par la i ème entrée/sortie (actionneur/capteur).

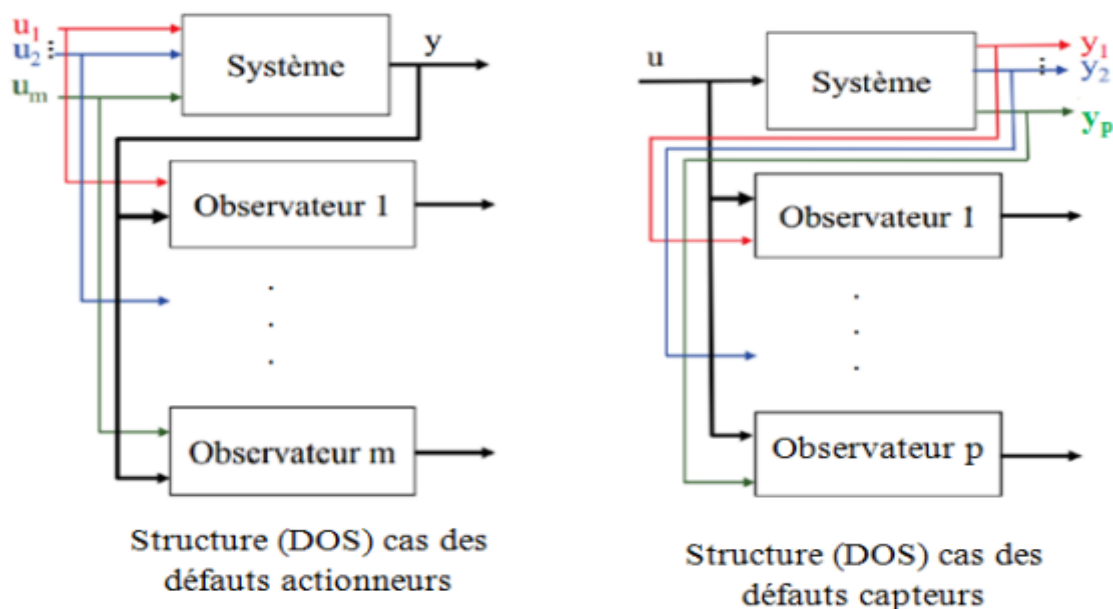


Figure I.7 -Structure d'observateurs dédiés.[23]

C-Structure d'observateurs généralisés (GOS) :[23]

Dans cette structure (figure 1.8), il s'agit de synthétiser un certain nombre d'observateurs où chacun d'entre eux étant insensible à un seul défaut. Si un défaut apparaît alors, toutes les estimations d'états seront erronées sauf celles issues de l'observateur insensible à ce seul défaut. Ce schéma offre plus de degrés de liberté pour la conception de l'observateur et permet d'augmenter la robustesse. Dans cette structure le i ème observateur est piloté par toutes les entrées/sorties (actionneur/capteur) sauf la i ème entrée/sortie.

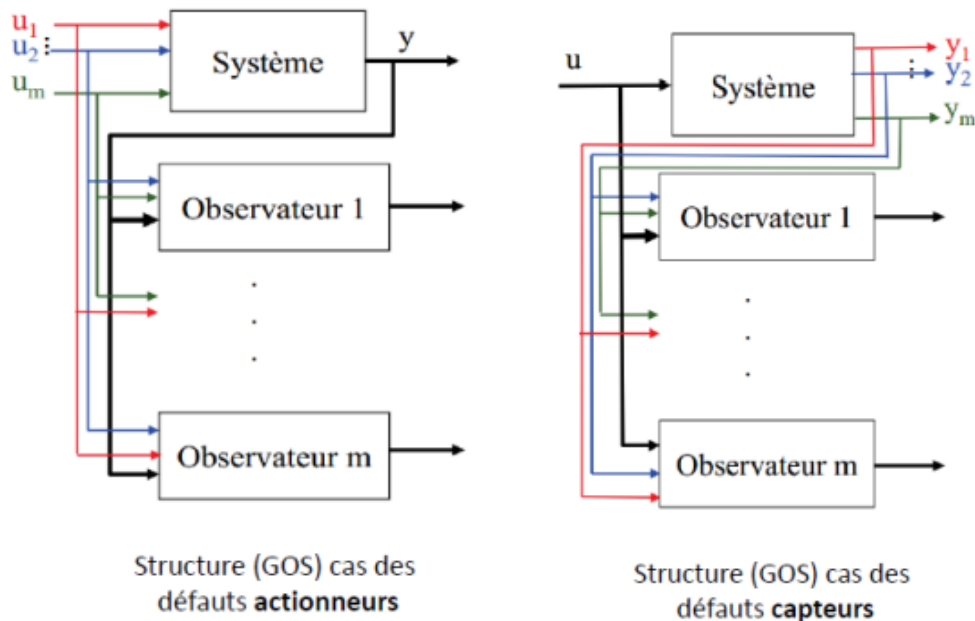


Figure I.8 - Structure d'observateurs généralisés [23]

I.6 Les systèmes tolérants aux défauts :

Par définition, un système tolérant aux défauts possède la capacité de maintenir les objectifs nominaux en dépit de l'occurrence d'un défaut et à s'en accommoder de manière automatique. Il permet notamment de garantir la stabilité du système et/ou des performances acceptables en présence de défauts [24].

I.6.1 Objectifs de la commande tolérante aux défauts

L'objectif principal de la commande tolérante aux défauts est d'assurer un fonctionnement sécurisé et acceptable des systèmes en présence de défaillances, en maintenant des performances dégradées mais admissibles, ou en rétablissant les performances nominales après détection et compensation du défaut[25].

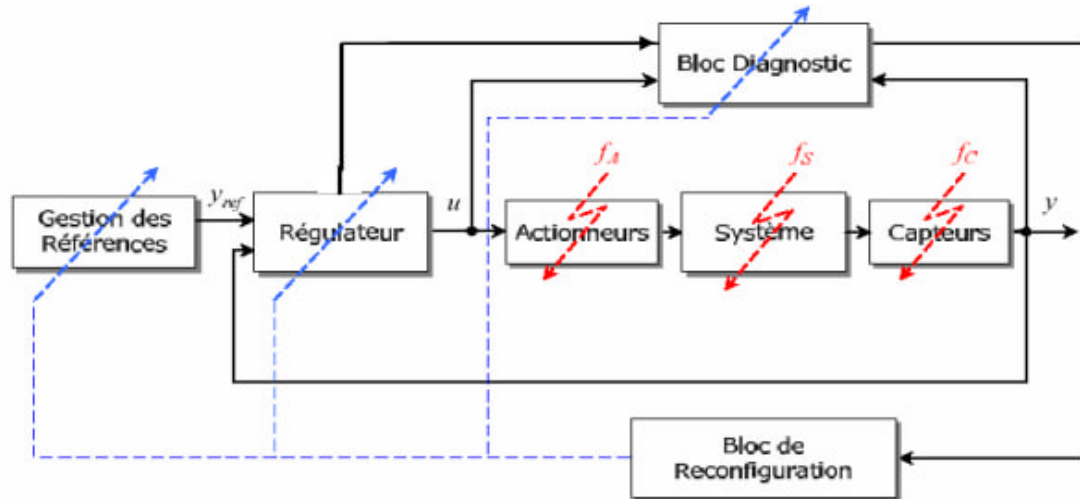


Figure I.9- Structure générale d'un système tolérant aux défauts [25]

La tâche principale qui incombe à la commande tolérante aux défauts est de synthétiser des lois de commande avec une structure permettant de garantir la stabilité et les performances du système, non seulement lorsque tous les composants de la commande sont opérationnels, mais aussi lorsque des capteurs ou des actionneurs sont défaillants.[27]

1.6.2 Classification des approches de la commande tolérante aux défauts

Dans la littérature, les approches de synthèse des systèmes de commande tolérante aux défauts sont généralement classées en deux grandes classes : les approches passives et les approches actives.

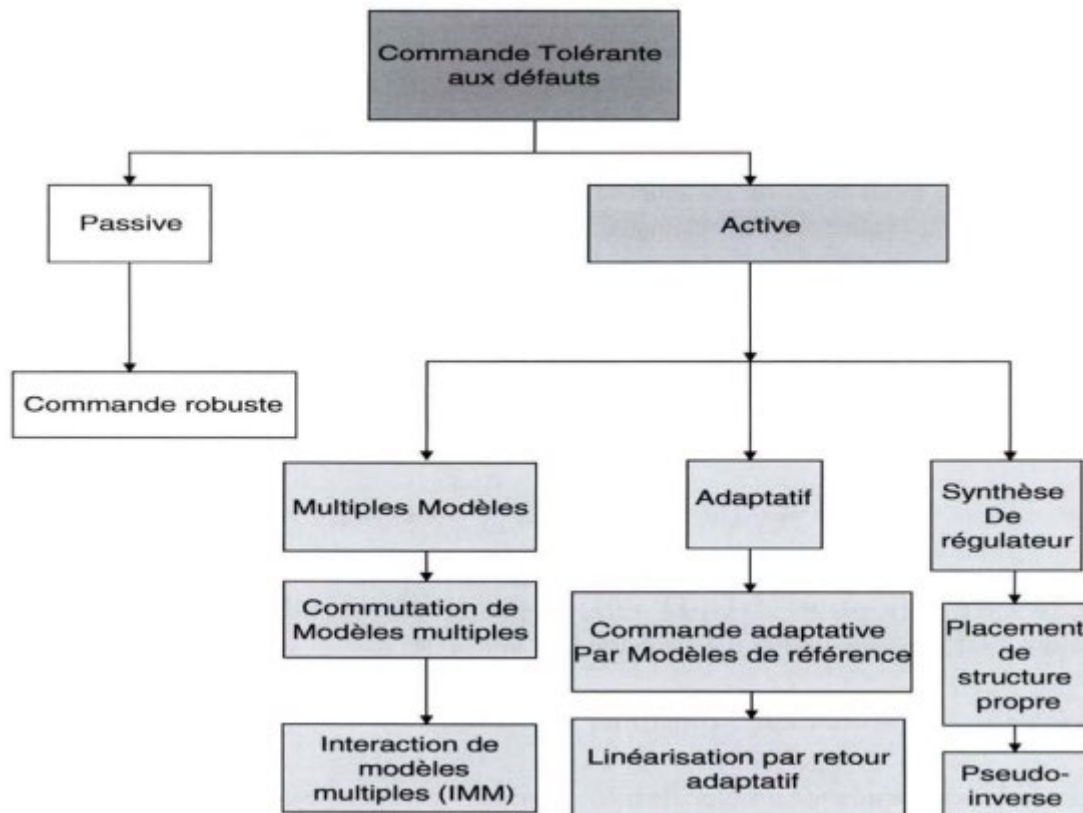


Figure I.10- Classification des approches de la commande tolérante aux défauts.[26]

I.6.2.1 Approche Passive : [28]

Dans le cadre de l'approche passive, les contrôleurs sont synthétisés de façon à être robustes à certains défauts. L'idée principale est de faire en sorte que le système en boucle fermée soit robuste aux incertitudes et à quelques défauts spécifiques et sans l'utilisation en ligne d'information sur les défauts. Cette approche ne nécessite aucun schéma de détection de défauts ni aucune reconfiguration de la loi de commande mais sa capacité de tolérance intrinsèque reste restreinte à quelques défauts. Dans le cas passif, le système en défaut continue d'opérer avec le même contrôleur et la même structure du système : les objectifs et les performances restent les mêmes que ceux du système nominal.

I.6.2.2 Approches actives : [25]

Contrairement à l'approche passive, l'approche active de commande tolérante aux fautes (AFTC) utilise des techniques d'ajustement en ligne des régulateurs afin de maintenir, au moins, la stabilité du système et, au mieux, le comportement nominal. Un schéma global de FTC active est représenté par la figure (1.11). Les approches FTC actives sont classiquement caractérisées par un module de détection et de diagnostic de défauts en ligne (FDD) et un

mécanisme de reconfiguration de commande. A partir des informations fournies par le module FDD, la reconfiguration permet de modifier la loi de commande ou la structure du régulateur. Sur la base de cette architecture, les objectifs de synthèse d'une FTC active sont : l'élaboration d'un schéma efficace de FDD pour fournir des informations sur les défauts et la reconfiguration du système de commande pour assurer la stabilité et des performances acceptables en boucle fermée.

Plusieurs méthodes de AFTC ont été proposées dans la littérature, telles que la méthode de pseudo-inverse, placement de structure propre, régulateur à commutation, commande adaptative, commande prédictive, neuro-flou, approches par modèles de référence. Dans le paragraphe suivant, nous présenterons brièvement quelques-unes de ces méthodes.

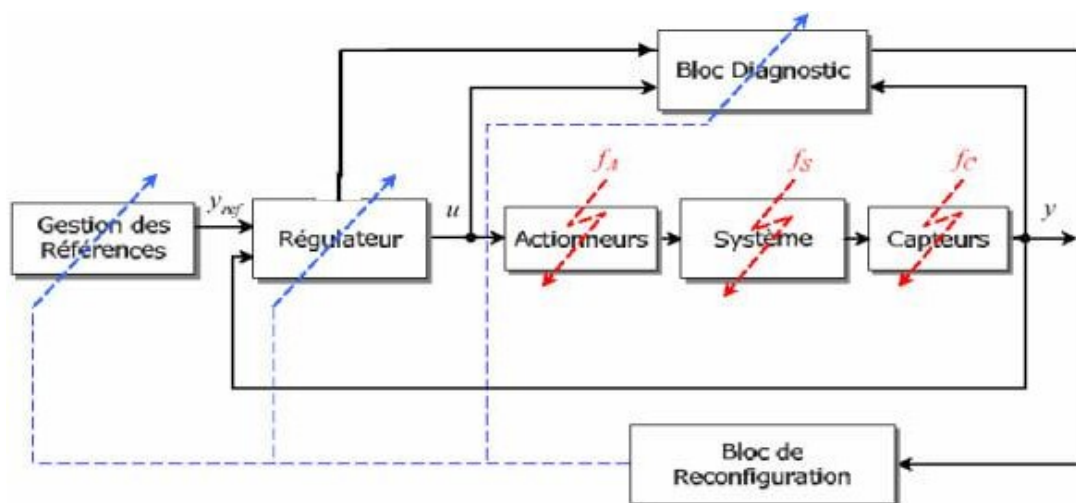


Figure I.11- Principe d'un système de commande active tolérante aux fautes.[23]

I) Méthode de la Pseudo-Inverse (PIM)

La méthode de pseudo-inverse [29] est une référence des plus citées dans le domaine de commande tolérante active aux défauts du fait de sa simplicité de calcul et sa capacité à manipuler une très large classe de défauts, à condition qu'ils soient prédéfinis. La version de base de la méthode pseudo-inverse (il en existe plusieurs autres revisitées comme récemment dans [30] considère un système linéaire nominal :

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \\ y_k = Cx_k \end{cases} \quad (1.8)$$

avec loi de commande de retour d'état $u_k = Fx_k$, sous l'hypothèse que le vecteur d'état est connu. Le système en défaut se représente de la manière suivante :

$$\begin{cases} x_{k+1}^f = A_f x_k^f + B_f u_k^R \\ y_k^f = C_f x_k^f \end{cases} \quad (1.9)$$

où la nouvelle loi de commande reconfigurée est de structure équivalente, c'est-à-dire $u_k^R = F_R x_k^f$. Le but est de trouver la matrice de gain de retour d'état F_R telle que la "distance" entre les matrices d'état des systèmes nominaux et en défaut soit minimisée :

$$\begin{cases} F_R = \arg \min \| (A + BF) - (A_f + B_f F_R) \|_{F_F} \\ = B_f^+ (AA + BF - A_f A_f) \end{cases} \quad (1.10)$$

où B_f^+ est la pseudo-inverse de la matrice B_f et $\| \cdot \|_F$ la norme de Frobenius.

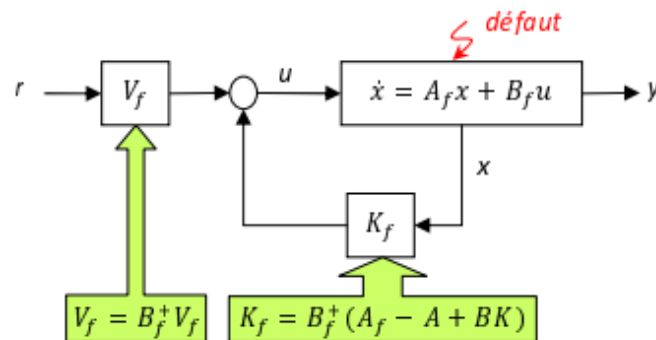


Figure I.12 Principe de la méthode PIM :[26]

Les avantages de cette approche résident dans le fait qu'elle est très appropriée pour une implémentation en ligne dû à sa simplicité et que les changements sur le système causés par un défaut, sont calculés directement.

Le principal inconvénient réside dans la non assurance de la stabilité du système en boucle fermée. Des exemples simples confirment ce fait notamment dans [29]. Afin de remédier à ce problème, une méthode de pseudo-inverse modifiée a été développée dans [31] en ajoutant une contrainte supplémentaire telle que le système en BF soit stable.

II) Commande adaptative : [32]

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. Elle utilise

des méthodes d'identification en ligne pour estimer régulièrement la valeur des paramètres θ et résoudre le problème de commande pour les variations de θ . Le principe d'un système de commande adaptative peut être illustré par la figure

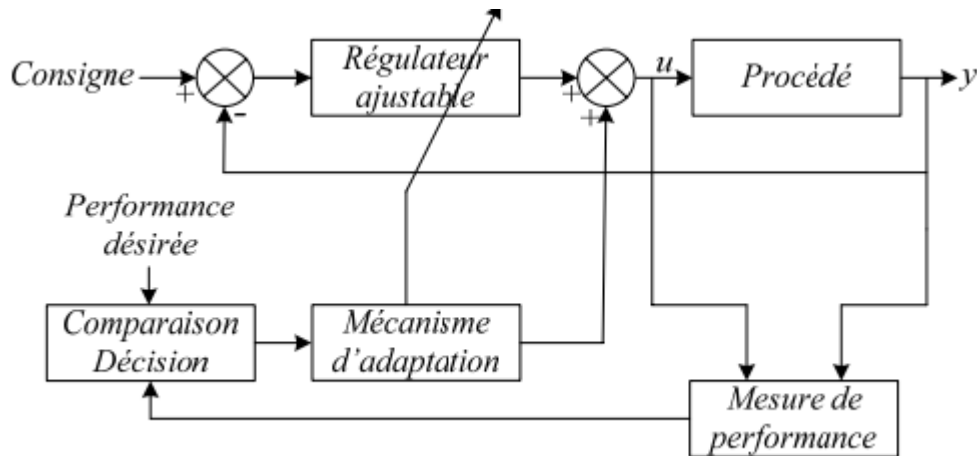


Figure I.13- Principe général d'un système de commande adaptative [32]

On distingue deux approches principales pour la commande adaptative :

Commande adaptative directe : les paramètres du régulateur sont ajustés directement et en temps réel à partir de comparaisons entre performances réelles et performances désirées

Commande adaptative indirecte : les paramètres du procédé sont estimés par une procédure d'identification, c'est le cas des régulateurs auto-ajustables (commande par placement de pôles adaptatifs). Ce type de commande adaptative est plus utilisé que le premier du fait qu'il tient compte des caractéristiques d'évolution du processus.

La tolérance aux fautes de ces méthodes reste encore limitée mais comparée aux méthodes passives, les techniques de la commande adaptative sont plus tolérantes parce que le calcul de la loi de commande dépend de l'état actuel des paramètres du procédé.

III) Commande LQ:

L'idée de base de la commande optimale quadratique linéaire [33], [34] consiste à concevoir, hors-ligne, un contrôleur linéaire invariant dans le temps en utilisant la technique LQ-optimale en fonction de l'objectif d'optimisation

$$\min_K \int_0^{\infty} (x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)) dt \quad (1.11)$$

La matrice de pondération semi-définie positive Q pénalisant l'erreur sur l'état et la matrice de pondération définie positive R pénalisant l'énergie de commande sont stockées pour une réutilisation en ligne, plus tard. Après l'identification d'un défaut, une nouvelle loi de commande reconfigurable est conçue en recalculant la matrice du gain de retour d'état K_f en utilisant le modèle (1.12) du système en "post-défaut" et la valeur nominale pondérée de Q et R ,

$$K_f = R^{-1}B_f^T P_f \quad (1.12)$$

où P_f est la solution de l'équation algébrique de Riccati

$$A_f^T P_f + P_f A_f - P_f B_f R^{-1} B_f^T P_f + Q = 0 \quad (1.13)$$

Si le système défectueux est contrôlable, il existe un contrôleur LQ capable de stabiliser le système à partir des matrices de pondération initiales de façon optimale. Dans ce cas, les performances de poursuite des trajectoires ne sont plus assurées. La figure 1.11 schématise le principe de cette technique.

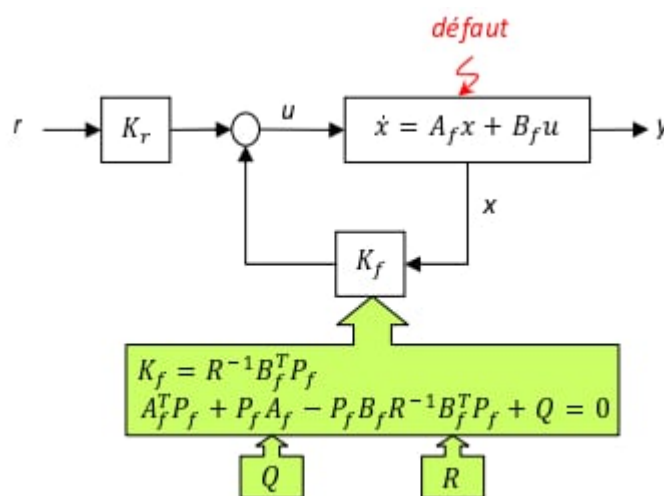


Figure I.14- Principe de la Commande LQ [34]

Le poids de Q et R , la relation entre ces poids nominaux et les performances reconfigurées de la boucle fermée est généralement délicate à définir.

A) III) Multiple Model Switching and Tuning (MMST)

L'approche multi-modèle concerne plus particulièrement la commande reconfigurable, notamment avec la méthode Multiple Model Switching and Tuning (MMST) [32] [33]

Lorsqu'un défaut apparaît, la stratégie MMST conduit à commuter sur une loi de commande pré-calculée correspondant à une situation donnée.

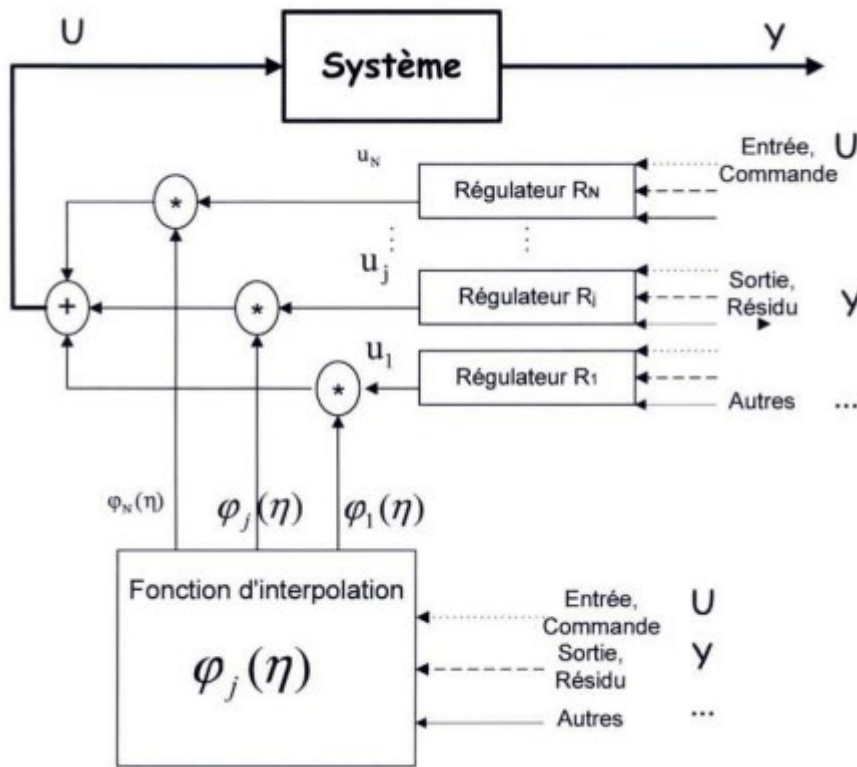


Figure I.15- Principe de la commande multi-régulateurs [34]

Ainsi, chaque scénario de défaut est décrit par un modèle différent. Ces modèles sont implantés en parallèle, où chacun possède un régulateur propre comme illustré à la figure (1.15). Le problème est alors équivalent à définir quel couple de modèle(M) jrégulateur(K) est le plus approprié pour une situation particulière à chaque instant. En présence d'un défaut, la représentation du système est supposée changer (en termes de distance notamment) d'un modèle nominal M_0 à un modèle de défaut M_f dans l'espace des paramètres. La méthode MMST permet de converger sur le modèle correct de défaut plus rapidement qu'une approche de modèle unique. Considérons les systèmes représentés sous la forme suivante [32] :

$$S = \begin{cases} \dot{x} = A_0(p(t))x + B_0(p(t))u \\ y = C_0(p(t))x \end{cases} \quad (1.14)$$

avec $x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, y \in \mathbb{R}^k, A_0 \in \mathbb{R}^{n \times n}, B_0 \in \mathbb{R}^{n \times m}, C_0 \in \mathbb{R}^{k \times n}$ et $p(t) \in \mathcal{S} \in \mathbb{R}^l$ définissent les paramètres du système. $p(t)$ varie dans le temps de manière brutale et représente les scénari de défauts.

I.7 Conclusion :

Ce chapitre a permis d'explorer de manière approfondie les concepts fondamentaux, les méthodes et les approches liées au diagnostic et à la commande tolérante aux fautes (Fault-Tolerant Control, FTC).

Dans un premier temps, nous avons exposé les définitions et concepts fondamentaux de diagnostic et les différents types de défauts qui peuvent apparaître dans un procédé industriel, après, nous avons donné une classification générale des méthodes de diagnostic divisant ces techniques entre celles sans modèle mathématique et celles basées sur un modèle.

Nous avons présenté aussi le principe de génération de résidus pour le diagnostic et les différents structures d'observateurs utilisés au diagnostic (simplifiés, dédiés, généralisés).

Enfin, nous avons exposé l'objectif de la commande tolérante aux défauts et les différentes approches existantes.

Chapitre II. Modélisation et commande d'un système hydraulique à quatre réservoirs

Chapitre II.: Modélisation et commande d'un système hydraulique à quatre réservoirs

II.1 Introduction :

Dans les systèmes industriels modernes, la gestion efficace des réservoirs souvent utilisés pour stocker des liquides ou des gaz, est un enjeu majeur pour garantir la performance, la sécurité et la stabilité.

Le présent chapitre se concentre sur la **modélisation mathématique** et la **commande PID** d'un système hydraulique à quatre réservoirs. La modélisation est une étape fondamentale pour comprendre le comportement dynamique du système et préparer sa mise en œuvre pratique. Elle permet de décrire les relations entre les entrées (par exemple, les tensions appliquées aux pompes) et les sorties (comme les niveaux d'eau dans les réservoirs). Ensuite, la conception d'une loi de commande basée sur l'algorithme **PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé)** vise à assurer un suivi précis des trajectoires souhaitées pour les niveaux d'eau dans les réservoirs inférieurs, malgré les incertitudes et perturbations inhérentes au système.

II.2 Description du système quatre réservoirs :

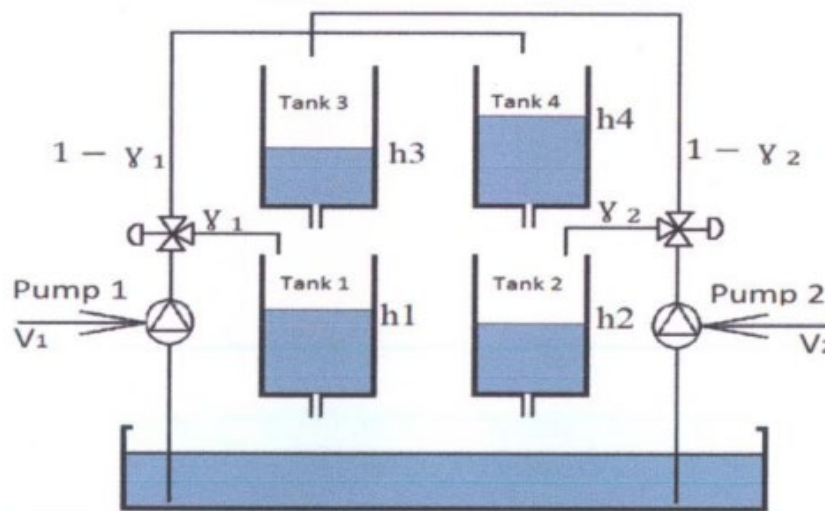


Figure II.1- Schéma du système à quatre réservoirs [36]

La position de la vanne V représente le ratio de débit de la pompe. Cette position détermine la répartition du débit de sortie de la pompe entre les réservoirs supérieur et inférieur.

L'entrée du **réservoir 1** et du **réservoir 4** est alimentée par la **pompe 1** à travers une vanne à trois voies avec un ratio de débit de **Y1** et **(1 - Y1)** respectivement. De même, l'entrée du **réservoir 2** et du **réservoir 3** est fournie par la **pompe 2** via une autre vanne à trois voies avec un ratio de débit de **Y2** et **(1 - Y2)** respectivement.

L'objectif du système est de **contrôler le niveau des réservoirs inférieurs**, donc les **niveaux des liquides dans les réservoirs inférieurs (h1, h2)** sont les sorties contrôlées. Le débit des pompes peut être ajusté à l'aide de **deux vannes de commande pneumatiques** de type **air-to-close** (fermeture par air). Le débit de la pompe reste constant tout au long du processus, mais le débit peut être modifié en ajustant la position du piston de la vanne de commande.

Le fonctionnement du **système quadruple réservoirs** peut être divisé en **deux phases** :

1. **Phase à minimum de phase**
2. **Phase à non-minimum de phase**

II.2.1 Modèle mathématique

Les entrées du processus sont les tensions des pompes et les sorties du processus sont les niveaux d'eau des réservoirs inférieurs dans la Figure.1. Pour chaque réservoir, le modèle mathématique est obtenu en utilisant la loi de Bernoulli et la loi de conservation de la masse.

Les numéros des réservoirs sont représentés par 'i', qui peuvent être 1, 2, 3, 4.

II.2.2 Le modèle non linéaire

Le modèle mathématique du processus est obtenu à partir de la loi de Bernoulli et de l'équation de conservation de la masse comme suit :

Taux d'accumulation = (Débit entrant) – (Débit sortant)

$$\begin{aligned} \frac{d(\rho V)}{dt} &= \rho q_{in} - \rho q_{out} \\ A_i \frac{dh_i}{dt} &= q_{in} - q_{out} \end{aligned} \quad (2.1)$$

A_i = Aire de la section transversale du réservoir

h_i = Niveau d'eau dans le réservoir

q_{in_i} = Débit entrant du réservoir

q_{out_i} = Débit sortant du réservoir

Le débit entrant du réservoir (q_{in_i}) dépend uniquement de la tension de la pompe d'entrée, tandis que le débit sortant du réservoir (q_{out_i}) dépend de la gravité et de l'accélération due à la hauteur d'eau dans le réservoir.

D'après l'équation de Bernoulli, q_{out_i} peut être déterminé comme suit :

$$\begin{aligned} q_{in_1} &= k_1 V_1 & q_{in_3} &= k_2 V_2 (1 - \gamma_2) \\ q_{in_2} &= k_2 V_2 & q_{in_4} &= k_1 V_1 (1 - \gamma_1) \end{aligned} \quad (2.2)$$

où k_1, k_2 sont les constantes de la pompe ; γ_1, γ_2 représentent le rapport des valeurs des positions de la vanne.

$$q_{out_i} = a_i \sqrt{2gh_i} \quad (2.3)$$

a_i : aire de la section transversale des tuyaux de sortie ;

g : accélération due à la gravité.

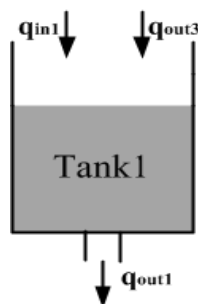


Figure II.2- Schéma d'un réservoir unique

En utilisant la loi de conservation de la masse :

$$A_i \frac{dh_i}{dt} = q_{in_1} + q_{out_3} - q_{out_1} = \gamma_1 k_1 V_1 + a_3 \sqrt{2gh_3} - a_1 \sqrt{2gh_1} \quad (2.4)$$

Les équations non linéaires du QTP sont données comme suit :

$$\begin{aligned} A_1 \frac{dh_1}{dt} &= -a_1 \sqrt{2gh_1} + a_3 \sqrt{2gh_3} + \gamma_1 k_1 v_1 \\ A_2 \frac{dh_2}{dt} &= -a_2 \sqrt{2gh_2} + a_4 \sqrt{2gh_4} + \gamma_2 k_2 v_2 \\ A_3 \frac{dh_3}{dt} &= -a_3 \sqrt{2gh_3} + (1 - \gamma_2) k_2 v_2 \\ A_4 \frac{dh_4}{dt} &= -a_4 \sqrt{2gh_4} + (1 - \gamma_1) k_1 v_1 \end{aligned} \quad (2.5)$$

II.3 Modèle linéarisé

Les équations en (2.5) contiennent des termes de racine carrée qui entraînent une non-linéarité. En conséquence, la conception d'un contrôleur devient plus difficile. L'équation (2.5) est résolue en utilisant le développement en série de Taylor aux points de fonctionnement et la transformation par matrice Jacobienne afin d'obtenir une forme d'espace d'état du QTP.

$$\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt} &= f_1(h_1, h_2, h_3 \dots h_n, u_1, u_2, u_3 \dots u_n) \\ \frac{dx_n}{dt} &= f_n(h_1, h_2, h_3 \dots h_n, u_1, u_2, u_3 \dots u_n)\end{aligned}\quad (2.6)$$

La forme vectorielle générale $\dot{x} = f(x, u)$ (x représente les états)

$$\text{Soit} \quad H_e = h_e + \Delta h \quad U_e = u_e + \Delta u$$

En utilisant le développement en série de Taylor pour obtenir l'approximation linéaire

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \frac{dx}{dt} f(H_e, U_e) = f(h_e + \Delta h, u_e + \Delta u) \\ f(x, u) &= f(h_e, u_e) + \frac{df}{dh}(h_e, u_e) + \frac{df}{du}(h_e, u_e) + \frac{\text{higher order terms}}{0}\end{aligned}$$

Pour simplifier, les termes d'ordre supérieur sont négligés.

$$\begin{aligned}\frac{dh_1}{dt} &= -\frac{a_1\sqrt{2gh_1}}{A_1} + \frac{a_3\sqrt{2gh_3}}{A_3} + \frac{\gamma_1 k_1 V_1}{A_1}, (u_1 = V_1; u_2 = V_2) \\ \frac{dh_1}{dt} - \frac{dh_{10}}{dt} &= -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_{10}}}(h_1 - h_{10}) + \frac{a_3}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_{30}}}(h_3 - h_{30}) + \frac{\gamma_1 k_1}{A_1}(V_1 - V_0) \\ \text{Soit } x_i &:= h_i - h_{i0} \quad \text{and } u_i := v_i - v_{i0};\end{aligned}\quad (2.7)$$

Ainsi, le système peut être représenté sous la forme d'espace d'état comme suit

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_1}} x_1 + \frac{a_3}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_{30}}} x_3 + \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} u_1 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2h_{20}}} x_2 + \frac{a_4}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2h_{40}}} x_4 + \frac{\gamma_2 k_2}{A_2} u_2 \\ \dot{x}_3 &= -\frac{a_3}{A_3} \sqrt{\frac{g}{2h_{30}}} x_3 + \frac{(1-\gamma_2)}{A_3} k_2 u_2 \\ \dot{x}_4 &= -\frac{a_4}{A_4} \sqrt{\frac{g}{2h_{40}}} x_4 + \frac{(1-\gamma_1)}{A_4} k_1 u_1\end{aligned}\quad (2.8)$$

$$\frac{dx}{dt} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} & 0 & \frac{A_3}{A_1 T_3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_2} & 0 & \frac{A_4}{A_2 T_4} \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_4} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} \\ 0 & \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_3} \\ \frac{(1-\eta_1)k_1}{A_4} & 0 \end{bmatrix} u \quad (2.9)$$

$$y = \begin{bmatrix} k_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_c & 0 & 0 \end{bmatrix} x$$

où les constantes de temps sont

$$T_i = \frac{A_i}{a_i} \sqrt{\frac{2h_{i0}}{g}}, i = 1, \dots, 4,$$

$$u = \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \\ \Delta h_4 \end{bmatrix} y = \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \end{bmatrix}$$

La matrice de fonction de transfert du système linéarisé peut être écrite comme suit :

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 c_1}{1+T_1} & \frac{(1-\gamma_2)c_1}{(1+T_3s)(1+T_1s)} \\ \frac{(1-\gamma_1)c_2}{(1+T_4s)(1+T_2s)} & \frac{\gamma_2 c_2}{1+T_2s} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 c_1}{1+T_1} & \frac{(1-\gamma_2)c_1}{(1+T_3s)(1+T_1s)} \\ \frac{(1-\gamma_1)c_2}{(1+T_4s)(1+T_2s)} & \frac{\gamma_2 c_2}{1+T_2s} \end{bmatrix}$$

Où $c_1 = T_1 k_1 k_c / A_1$ and $c_2 = T_2 k_2 k_c / A_2$ ci, le rapport k_1/k_2 est approximativement égal à 1. Les paramètres $\gamma_1, \gamma_2 \in (0,1)$ sont déterminés en fonction du réglage des vannes avant une expérience. En raison de ces valeurs, le processus peut agir en phase minimale ou non minimale, comme indiqué dans le Tableau 1..

Valve values	Process	Zero Location
$1 < \gamma_1 + \gamma_2 < 2$	minimum phase	Zero is in left half plan
$0 < \gamma_1 + \gamma_2 < 1$	Nonminimum phase	Zero is in right half plan
$\gamma_1 + \gamma_2 = 1$		Zero is located at the origin

Tableau II.1 – Réglage des vannes.

Parameter	Value
Height of tanks, h_{\max}	20 cm
Bottom area, Tank1, Tank3, A_1, A_3	28 cm ²
Bottom area, Tank 1, Tank3, A_2, A_4	32 cm ²
Out pipe cross-sections, a_1, a_3	0.071 cm ²
Out pipe cross-sections, a_2, a_4	0.057
Level measurement device constant, k_c	0.500 V/cm
Gravity g	981 cm/s ²

Tableau II.2 – Paramètres du processus

Parameters	Minimum-Phase	Nonminimum-Phase
(h_{10}, h_{20}) cm	(12.26,12.78)	(12.44,13.17)
(h_{30}, h_{40}) cm	(1.63,1.41)	(4.73,4.99)
(v_1, v_2) V	(3.00,3.00)	(3.15,3.15)
(k_1, k_2) cm ³ /Vs	(3.33,3.35)	(3.14,3.29)
(γ_1, γ_2)	(0.70,0.60)	(0.43,0.34)

Tableau II.3 – Points de fonctionnement

En utilisant les paramètres des points de fonctionnement, la modélisation physique donne les matrices de transfert en phase minimale et en phase non minimale dans l'équation (2.11) et l'équation (2.12), respectivement.

$$G(s)_- = \begin{bmatrix} \frac{2.6}{1 + 62.3s} & \frac{1.48}{(1 + 22.8s)(1 + 62.3)} \\ \frac{1.4}{(1 + 30s)(1 + 90.6s)} & \frac{2.84}{1 + 90.6s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$G(s)_+ = \begin{bmatrix} \frac{1.5}{1 + 62.8s} & \frac{2.7}{(1 + 38.7s)(1 + 62.8)} \\ \frac{1.4}{(1 + 56.6s)(1 + 92s)} & \frac{1.61}{1 + 92s} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

II.4 Partie simulation :

II.4.1 Cas non linéaire :

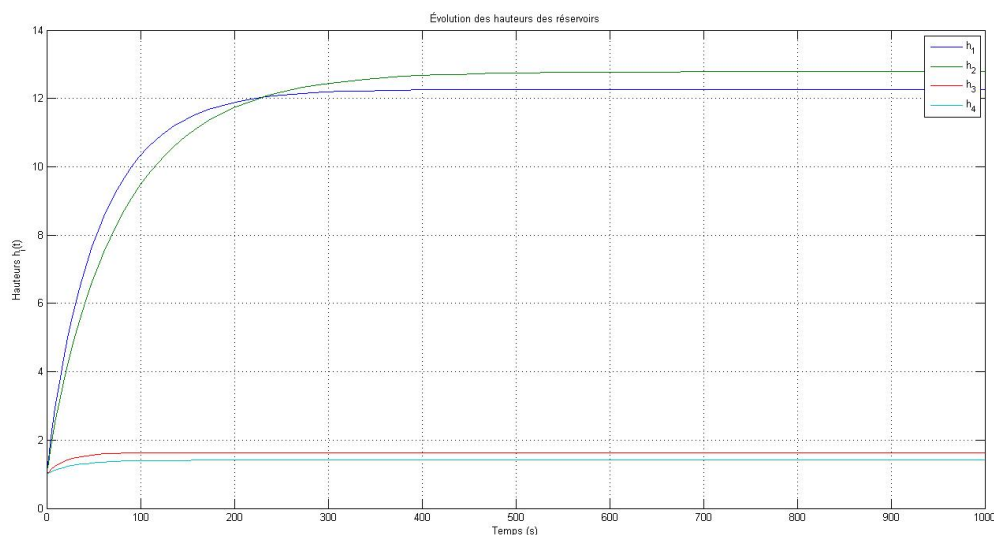


Figure II.3- Évolution des hauteurs des réservoirs dans le cas non linéaire

La Figure II.3 représente l'évolutions des états du systèmes à quatre réservoirs non linéaire en remarque le temps du réponse du système est d'environ $t=300s$.

II.4.2 Cas linéaire :

II.4.2.1 Système en boucle ouverte sans perturbation

Une version linéarisée du modèle autour d'un point d'équilibre nominal est utilisée pour simplifier l'analyse et faciliter la synthèse de lois de commande classiques.

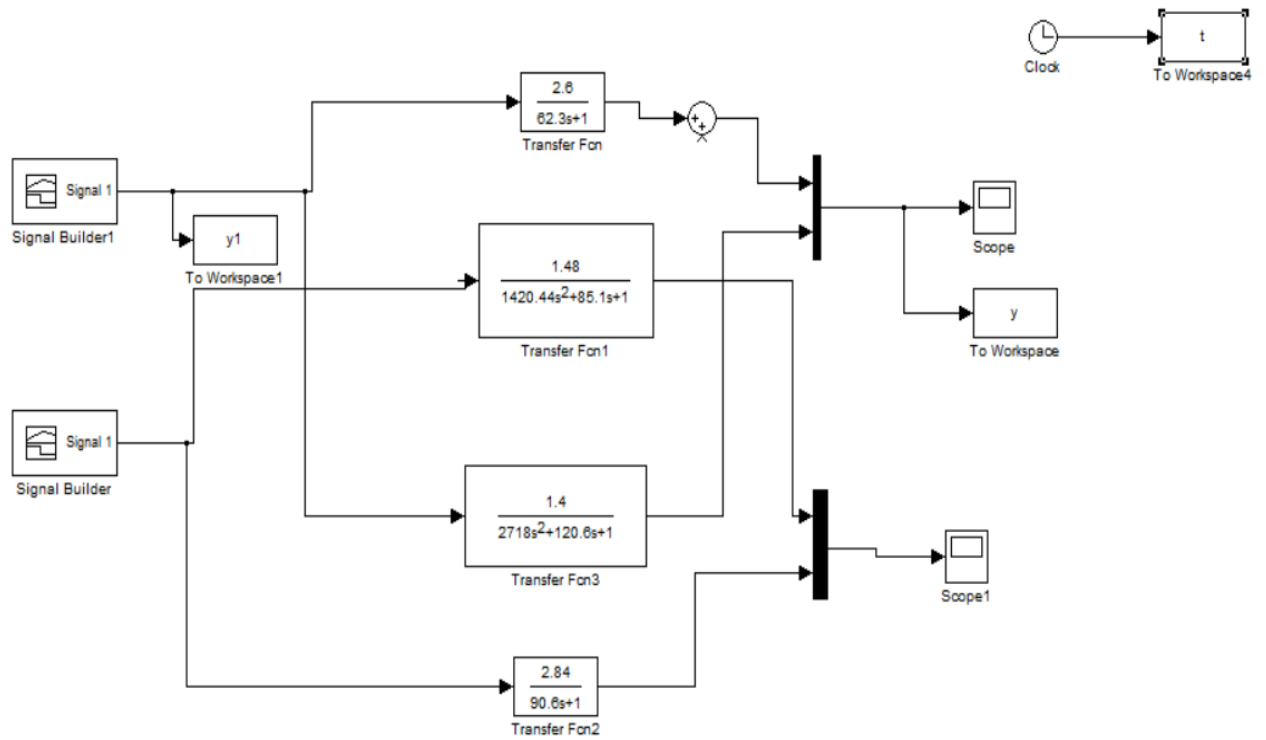


Figure II.4- Schéma de simulation du système à quatre réservoirs sans perturbation

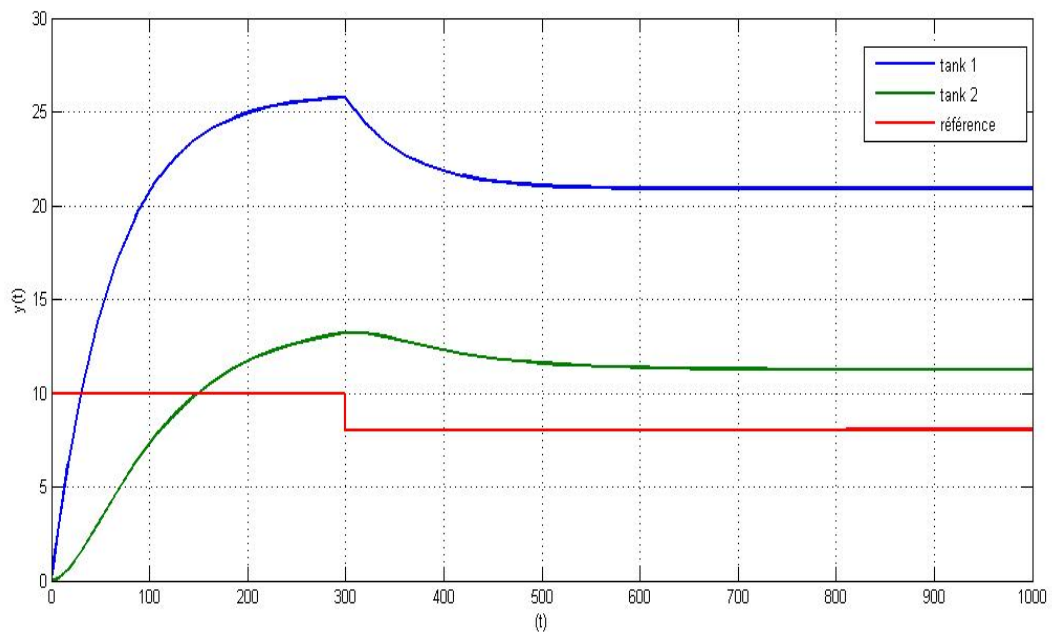


Figure II.5 -Réponse temporelle du système en boucle ouverte sans perturbation

II.4.2.2 Système en boucle ouverte avec perturbation

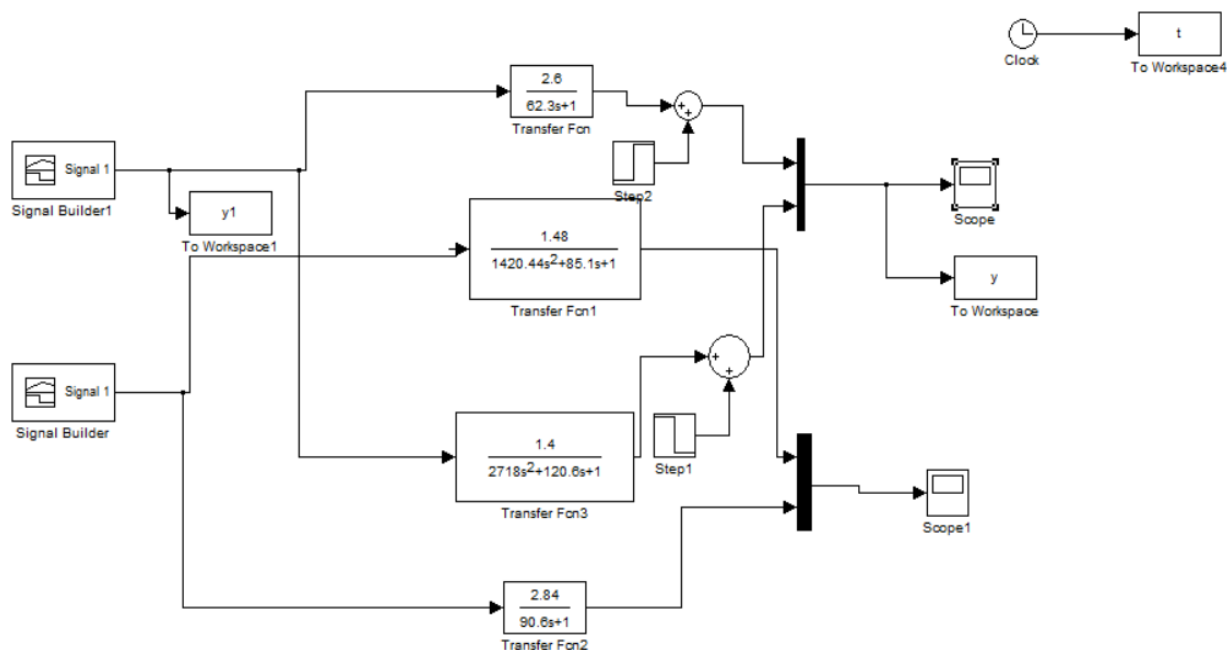


Figure II.6- Schéma de simulation du système en boucle ouverte avec perturbation

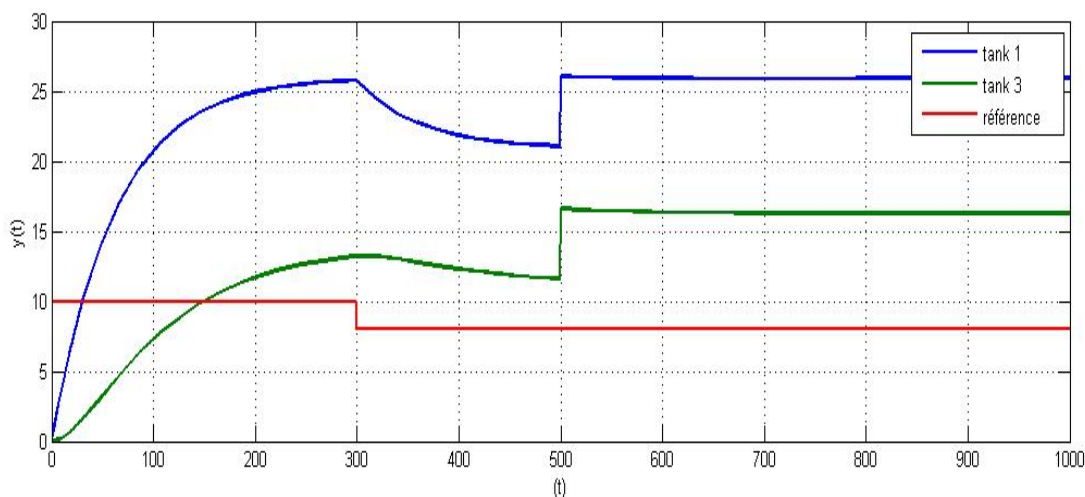


Figure II.7- Réponse temporelle du système en boucle ouverte avec perturbation appliquée

La Figure II.5 et la Figure II.7 représentent l'évolution des sorties du système à quatre réservoirs simultanément sans perturbations et avec perturbations, en remarque que les sorties ne suivent pas les consignes, car le système en boucle ouverte n'est pas commandé et les sorties deviennent sensible en présence de perturbations.

II.4.2.3 Système en boucle fermée avec contrôle PID en absence de perturbations

Dans l'étape suivante, afin d'améliorer la précision, la rapidité et la stabilité de la réponse du système, on utilise un correcteur PID. Pour utiliser un régulateur PID (Proportionnel–Intégral–Dérivé), il est d'abord nécessaire de déterminer les trois paramètres essentiels : K_p (gain proportionnel), T_i (temps intégral) et T_d (temps dérivé). Ces paramètres sont indispensables pour assurer un bon réglage du contrôleur et obtenir une réponse optimale. Pour les calculer, on utilise la **méthode de Ziegler-Nichols**, qui est une méthode expérimentale consistant à placer le système en mode proportionnel pur, puis à augmenter progressivement K_p jusqu'à obtenir des oscillations continues. Une fois le **gain critique** (K_u) et la **période d'oscillation critique** (P_u) déterminés, on applique les formules de Ziegler-Nichols pour calculer les valeurs de K_p , T_i et T_d à intégrer dans le régulateur PID.

Type	K_p	$T_i T_i$	T_d
P	$0.5K_c$		
PI	$0.4K_c$	$0.8TT_0$	
PID	$0.6K_c$	$0.5T_0$	$0.125TT_0$

Tableau II.4 – Paramètres des régulateurs P, PI et PID obtenus à partir d'une réponse indicielle en boucle fermée

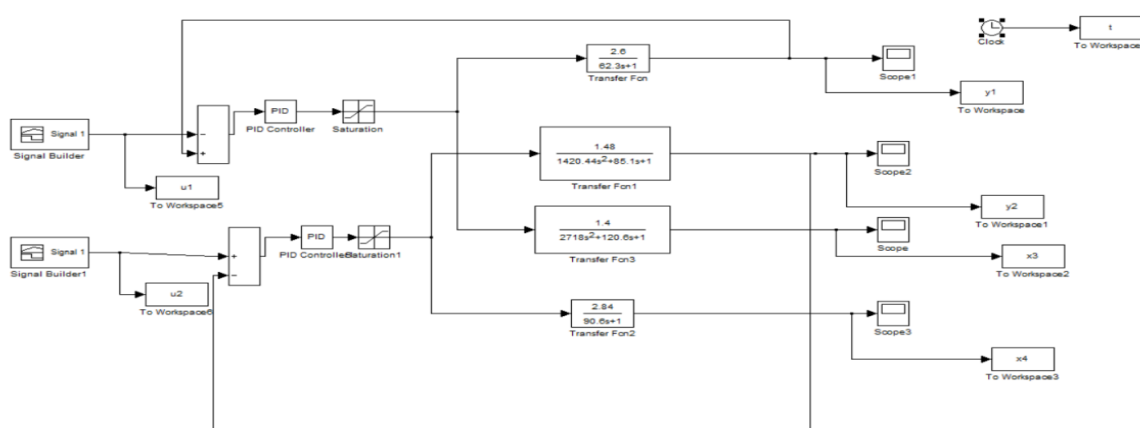


Figure II.8-Schéma de simulation du système à quatre réservoirs commandé par PID , en absence de perturbations

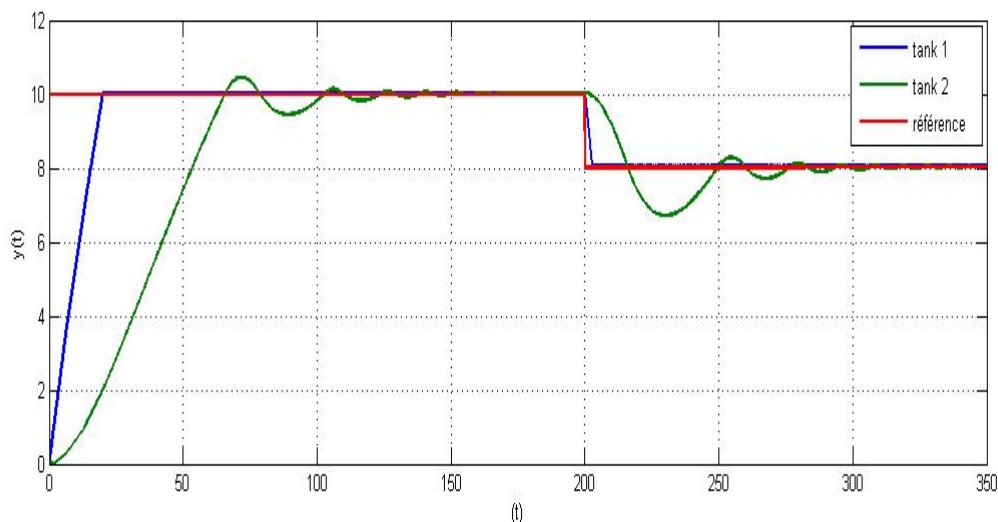


Figure II.9- Réponse du système en boucle fermée avec PID

La Figure II.9 montre l'évolution des sortie du système à quatre réservoir contrôle par un PID , en remarque l'amélioration du temps de réponse et la bonne poursuite de trajectoire.

II.4.2.4 Système en boucle fermée avec contrôle PID en présence de perturbations

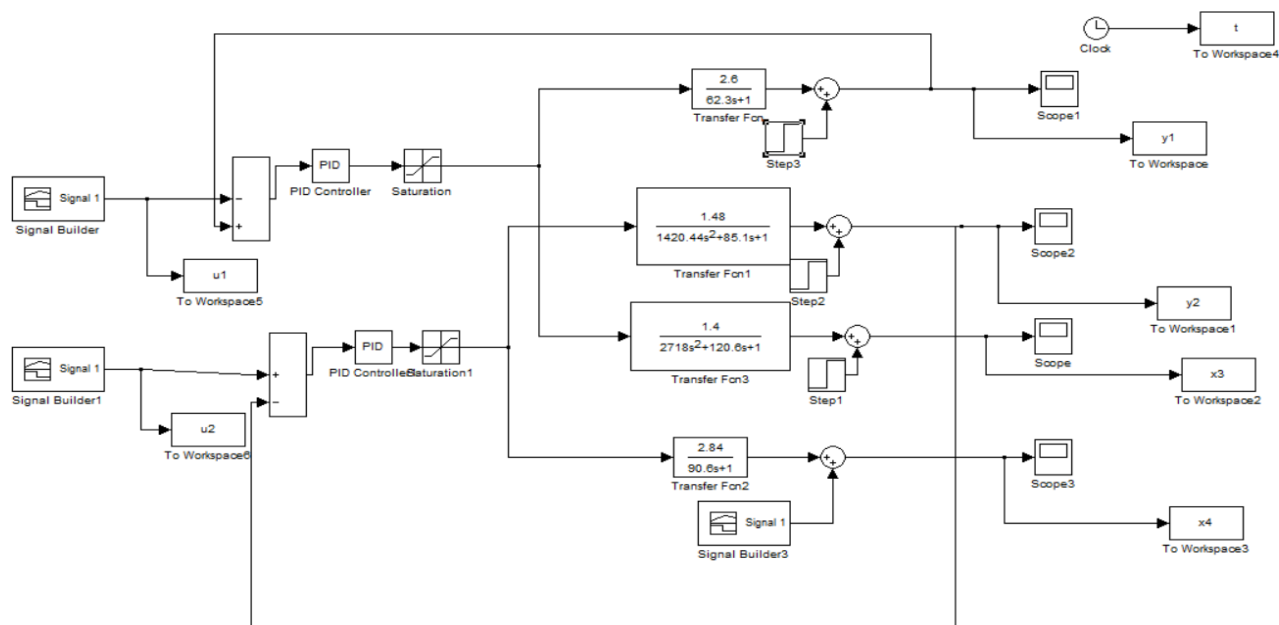


Figure II.10- Schéma d'un système en boucle fermée avec régulateur PID et en présence de perturbations

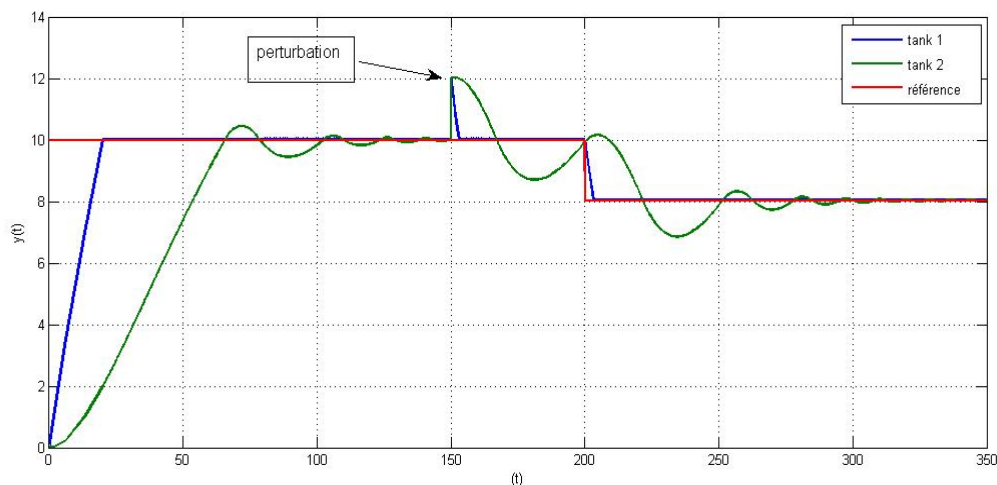


Figure II.11- Réponse des réservoirs avec PID en présence d'une perturbation

Vers $t \approx 160$ s, une perturbation est appliquée.

La Figure II.11 montre l'évolution du système à quatre réservoirs commandé par PID et soumis à une perturbation à l'instant $t=160$ s.

En remarque un bon rejet de perturbations du système commandé par PID.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une description détaillée du système à quatre réservoirs avec son modèle non linéaire et son modèle linéaire.

Un contrôleur PID est conçu pour contrôler le procédé à quatre réservoirs, le contrôleur proposé a amélioré la rapidité du système et la poursuite de trajectoire. En remarque aussi que ce contrôleur est robuste aux perturbations.

Chapitre III. Diagnostic et commande tolérante aux défauts du système à quatre réservoirs

Chapitre III. Diagnostic est commande tolérante aux défauts du système à quatre réservoirs

III.1 Introduction

Les systèmes a réservoirs multiples sont couramment utilisé dans diverses applications industrielles, telles que les eaux, la chimie, les hydrocarbures, la présence de défauts dans ces systèmes peut compromettre la stabilité et leur performances

L'objectif est concevoir des méthodes de diagnostic de défauts efficaces, et de proposer des stratégies de commande tolérante aux défauts pour maintenir les performances du système

Ainsi, le système peut être représenté sous la forme d'espace d'état comme suit

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_1}} x_1 + \frac{a_3}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_{30}}} x_3 + \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} u_1 \\
 \dot{x}_2 &= -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2h_{20}}} x_2 + \frac{a_4}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2h_{40}}} x_4 + \frac{\gamma_2 k_2}{A_2} u_2 \\
 \dot{x}_3 &= -\frac{a_3}{A_3} \sqrt{\frac{g}{2h_{30}}} x_3 + \frac{(1-\gamma_2)}{A_3} k_2 u_2 \\
 \dot{x}_4 &= -\frac{a_4}{A_4} \sqrt{\frac{g}{2h_{40}}} x_4 + \frac{(1-\gamma_1)}{A_4} k_1 u_1
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\frac{dx}{dt} = \begin{bmatrix} -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_1}} & 0 & \frac{a_3}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_3}} & 0 \\ 0 & -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2h_2}} & 0 & \frac{a_4}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2h_4}} \\ 0 & 0 & -\frac{a_3}{A_3} \sqrt{\frac{g}{2h_3}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{a_4}{A_4} \sqrt{\frac{g}{2h_4}} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} \\ 0 & \frac{(1-\gamma_2) k_2}{A_3} \\ \frac{(1-\gamma_1) k_1}{A_4} & 0 \end{bmatrix} u \tag{3.2}$$

$$y = \begin{bmatrix} kc & kc & kc & kc \\ kc & kc & kc & kc \\ kc & kc & kc & kc \\ kc & kc & kc & kc \end{bmatrix} x \tag{3.3}$$

Pour:

$A_1=28; A_2=32; A_3=28; A_4=32; a_1=0.071; a_2=0.057; a_3=0.071;$
 $a_4=0.057; g=981; \gamma_1=0.7; \gamma_2=0.6; k_1=3.33; k_2=3.35;$
 $k_c=0.5; h_1=12.26; h_2=12.78; h_3=1.63; h_4=1.41;$

$$A = \begin{bmatrix} -0.1966 & 0 & 0.0717 & 0 \\ 0 & -0.1410 & 0 & 0.0468 \\ 0 & 0 & -0.0717 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0468 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0.0833 & 0 \\ 0 & 0.0628 \\ 0 & 0.0479 \\ 0.0312 & 0 \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}; \quad D=0$$

Ainsi :

Le modèle linéaire du système hydraulique est donné par les deux équations :

$$\frac{dx}{dt} = \begin{bmatrix} -0.1966 & 0 & 0.0717 & 0 \\ 0 & -0.1410 & 0 & 0.0468 \\ 0 & 0 & -0.0717 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0468 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0.0833 & 0 \\ 0 & 0.0628 \\ 0 & 0.0479 \\ 0.0312 & 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix} x \quad (3.4)$$

III.2 Construction de l'observateur à entrée inconnue

III.2.1 Construction de l'observateur à entrée inconnue en absence de défauts

Pour construire l'observateur il est important de s'assurer de ces deux conditions :

1. L'observabilité du système,
 2. Le nombre d'entrées inconnues doit être inférieur ou égale au nombre de sorties du système
- Vérification de l'observabilité du système

$$O = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ CA^3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 \\ -0.1966 & 0 & 0.0717 & 0 \\ 0 & -0.1410 & 0 & 0.0468 \\ 0 & 0 & -0.0717 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0468 \\ 0.0387 & 0 & -0.0192 & 0 \\ 0 & 0.0199 & 0 & -0.0088 \\ 0 & 0 & 0.0051 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0022 \\ -0.0076 & 0 & 0.0042 & 0 \\ 0 & -0.0028 & 0 & 0.0013 \\ 0 & 0 & -0.0004 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0001 \end{bmatrix}$$

$\det(O) \neq 0$ donc $\text{Rang}(O) = 4$ et le système est observable.

- On suppose que le nombre d'entrée inconnues du système hydraulique est 2

Comme les deux conditions précédentes sont vérifiées alors on peut construire l'observateur à entrée inconnue.

On suppose que le modèle du système hydraulique avec entrée inconnue est :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Wd(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3.5)$$

Posons W la matrice de distribution de l'entrée inconnue comme suit

$$W = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Le modèle de l'observateur à entrée inconnue du système hydraulique est donné par :

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Nz(t) + Gu(t) + Ly(t) \\ \hat{x}(t) = z(t) + Hy(t) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (3.6)$$

Avec:

$$H = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} 0.8 & -0.4 & 0 & 0 \\ -0.4 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0.0666 & -0.0251 \\ -0.0333 & 0.0126 \\ 0 & 0.0479 \\ 0.0312 & 0 \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} -0.9439 & 0.0564 & -0.0143 & -0.0187 \\ 0.0787 & -0.5923 & -0.0287 & -0.0375 \\ 0 & 0 & -0.3585 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.2342 \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} 0.6204 & -0.3324 & 0.0717 & 0 \\ -0.2212 & 0.1217 & 0 & 0.0468 \\ 0 & 0 & 0.2868 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1874 \end{bmatrix}$$

Alors le modèle de l'observateur à entrée inconnue devient :

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= \begin{bmatrix} -0.9439 & 0.0564 & -0.0143 & -0.0187 \\ 0.0787 & -0.5923 & -0.0287 & -0.0375 \\ 0 & 0 & -0.3585 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.2342 \end{bmatrix} z(t) \\ &+ \begin{bmatrix} 0.0666 & -0.0251 \\ -0.0333 & 0.0126 \\ 0 & 0.0479 \\ 0.0312 & 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0.6204 & -0.3324 & 0.0717 & 0 \\ -0.2212 & 0.1217 & 0 & 0.0468 \\ 0 & 0 & 0.2868 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1874 \end{bmatrix} y(t) \\ \hat{x}(t) &= z(t) + \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} y(t) \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{x}(t)$$

Il est à noter que N est choisi comme une matrice de Hurwitz avec les valeurs propres :

$$p_1 = -0.9832, p_2 = -0.7051, p_3 = -0.3585; p_4 = -0.2342$$

III.2.2 Simulation de l'observateur en absence de défauts

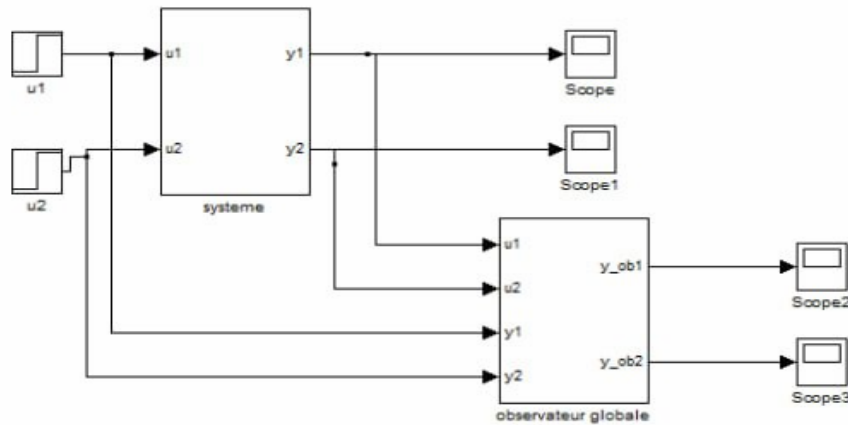


Figure III.1– Schéma de simulation du système sans défauts.

Après la simulation du système sur MATLAB nous avons obtenu les résultats présentés dans les figures III.2, III.3et III.4ci-dessous:

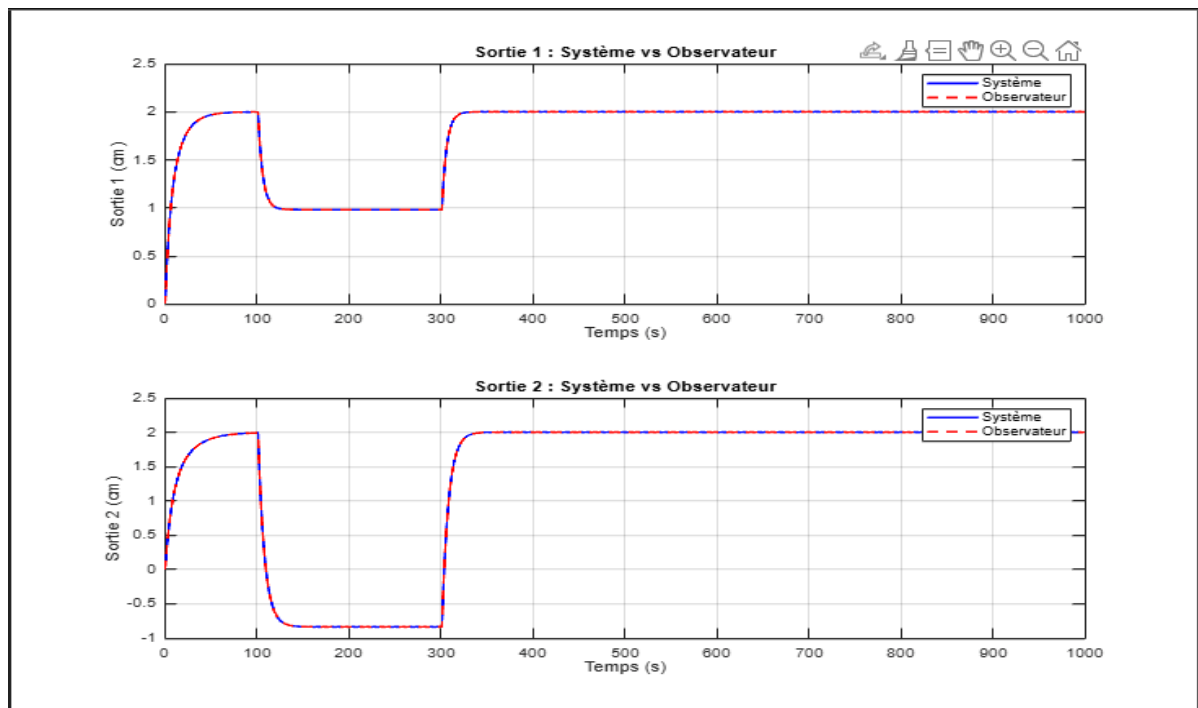


Figure III.2– l'évolution d'état d'observateur et la sortie du système

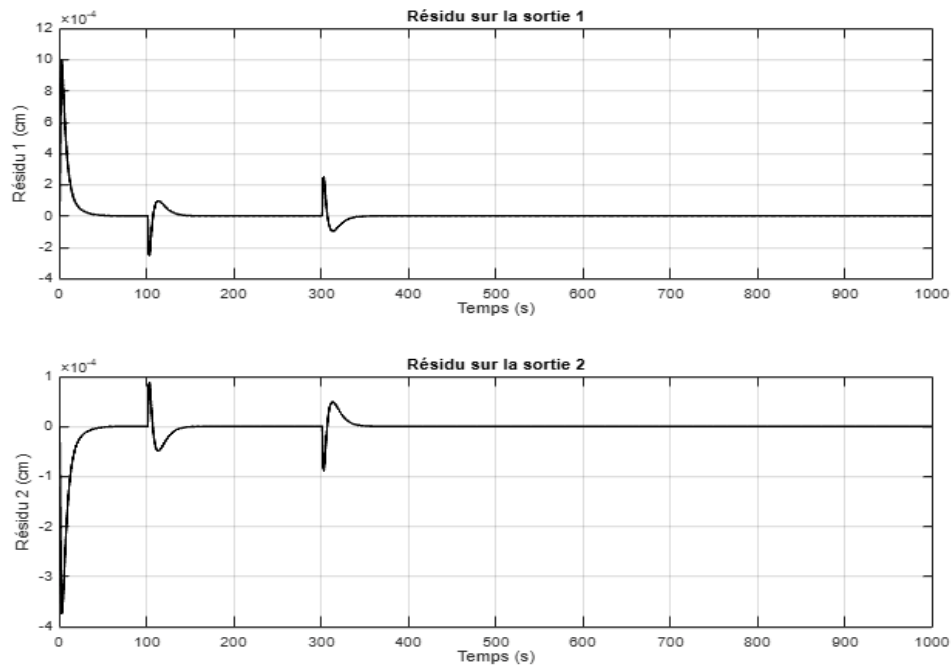


Figure III.3– Les résidus en absence de défauts

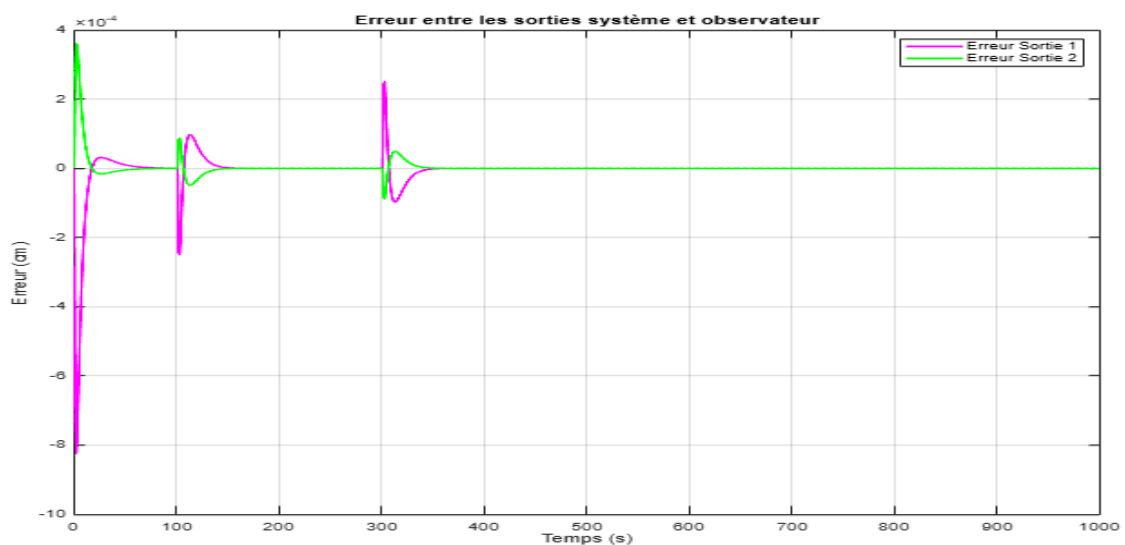


Figure III.4 – L'erreur d'estimation

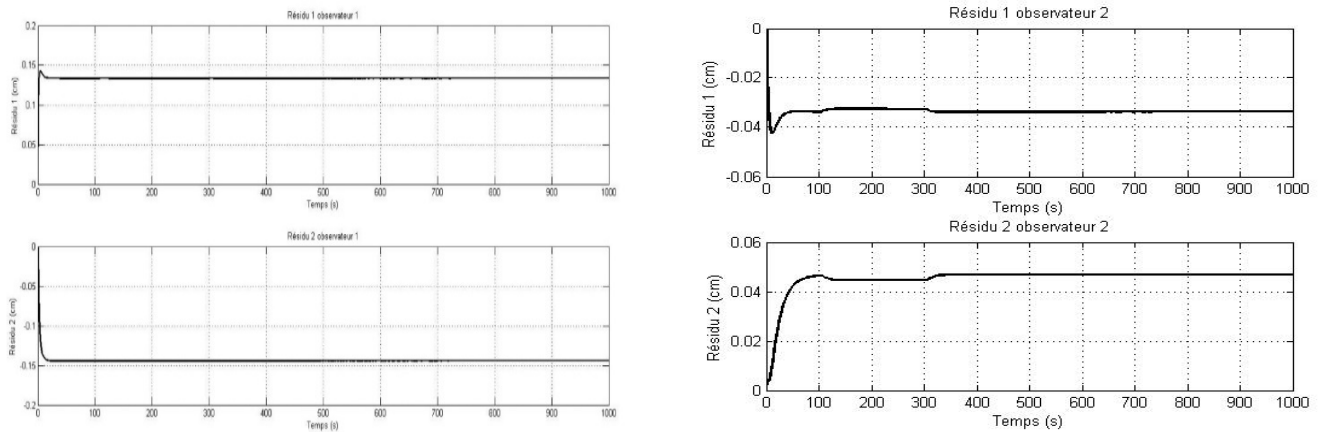
Les figures III.2, III.3 et III.4 représentent les résultats de simulation, en absence de défauts. On constate que l'observateur a bien estimé les états du système, L'erreur d'estimation converge vers zéro, les résidus sont presque nuls. Cela dit qu'il est insensible aux entrées inconnues.

III.3 Construction du banc d'observateur pour localisation de défauts actionneurs

Nous avons deux entrées alors nous allons construire deux observateurs et chaque observateur sera insensible à un seul défaut et sensible aux autres. Les calculs sont faits avec

un programme MATLAB nous avons obtenu les résultats suivants : ($p = [-0.9832, -0.7051, -0.3585, -0.2342]$ pour les deux observateurs)

III.3.1 Résultats de simulation



a. Résidus premier observateur

b. Résidus deuxième observateur

Figure III.5– Evolution des résidus en absence de défauts

En l'absence de défauts, les résidus doivent théoriquement converger vers zéro si l'observateur est parfaitement calibré.

III.4 Détection et localisation de défauts actionneurs

on considère le banc d'observateurs suivant :

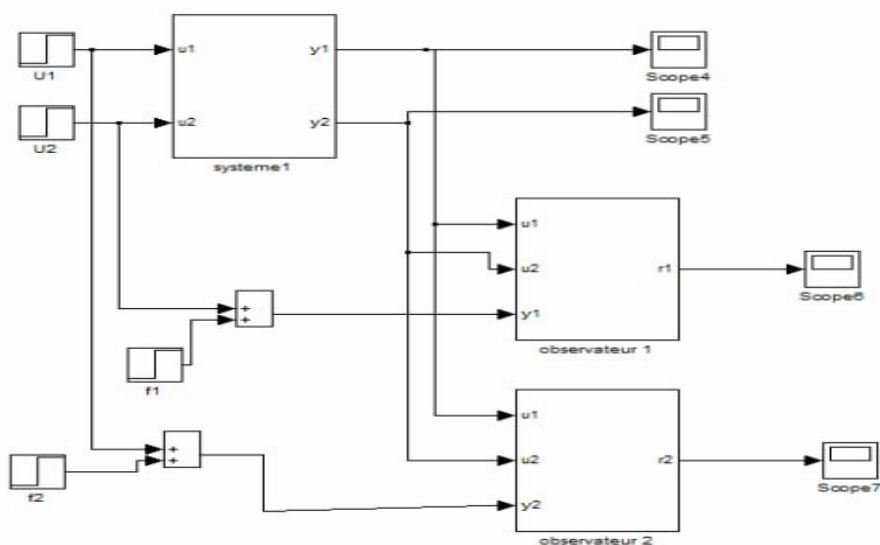


Figure III.6– Structure d'observateurs généralisée (GOS).

III.4.1 Construction de l'observateur à entrée inconnue en présence de défauts

On suppose que le modèle du système hydraulique avec défauts est défini par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Wd(t) + F_x f(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3.8)$$

Posons la matrice de distribution de défaut actionneur F_x et la matrice de distribution de l'entrée inconnue W .

$$F_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, W = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Pour construire l'observateur il est important de s'assurer de ces deux conditions :

1. L'observabilité du système
2. Le nombre d'entrées inconnues doit être inférieur ou égale au nombre de sorties du système.

Comme ces conditions sont vérifiées alors on peut construire l'observateur.

$$\text{Et le modèle de l'observateur : } \begin{cases} \dot{z}(t) = Nz(t) + Gu(t) + Ly(t) \\ \hat{x}(t) = z(t) + Hy(t) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\text{La dynamique de l'erreur : } \quad \dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \quad (3.10)$$

L'objectif est de rendre l'erreur d'estimation indépendante de l'état, de l'entrée de commande et de l'entrée inconnue et sensible uniquement aux défauts. Alors il convient de calculer les matrices de l'observateur qui satisfont les conditions suivantes :

N : matrice de Hurwitz

$$\begin{aligned} PA - NP - LC &= 0 \\ PB - G &= 0 \\ P &= I - HC \\ PW &= 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

On remarque qu'on a les mêmes équations que celles en absence de défauts

D'où les valeurs des matrices restent les mêmes et le modèle de l'observateur global est :

$$\begin{aligned}
 \hat{z}(t) &= \begin{bmatrix} -0.9439 & 0.0564 & -0.0143 & -0.0187 \\ 0.0787 & -0.5923 & -0.0287 & -0.0375 \\ 0 & 0 & -0.3585 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.2342 \end{bmatrix} z(t) \\
 &+ \begin{bmatrix} 0.0666 & -0.0251 \\ -0.0333 & 0.0126 \\ 0 & 0.0479 \\ 0.0312 & 0 \end{bmatrix} u(t) \begin{bmatrix} 0.6204 & -0.3324 & 0.0717 & 0 \\ -0.2212 & 0.1217 & 0 & 0.0468 \\ 0 & 0 & 0.2868 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1874 \end{bmatrix} y(t) \\
 \hat{x}(t) &= z(t) + \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} y(t) \tag{3.12}
 \end{aligned}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{x}(t)$$

• Modèle du premier observateur

$$\begin{aligned}
 \hat{z}(t) &= \begin{bmatrix} -0.7866 & 0 & -0.0717 & 0 \\ 0 & -0.5641 & 0 & -0.0468 \\ 0 & 0 & -0.2868 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.1874 \end{bmatrix} z(t) \\
 &+ \begin{bmatrix} -0.08497 \\ -0.2949 \\ -0.2997 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \begin{bmatrix} -0.2220 & -0.1175 & -0.0139 & -0.0078 \\ 0.0204 & -0.1110 & -0.0125 & -0.0208 \\ 0.0125 & -0.0202 & -0.0555 & -0.0065 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} y(t) \\
 \hat{x}(t) &= z(t) + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} y(t) \tag{3.13}
 \end{aligned}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{x}(t)$$

• Modèle du deuxième observateur

$$\hat{z}(t) = \begin{bmatrix} -0.7866 & 0 & -0.0717 & 0 \\ 0 & -0.5641 & 0 & -0.0468 \\ 0 & 0 & -0.2868 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.1874 \end{bmatrix} z(t) + \begin{bmatrix} 0.47615 \\ 0.5936 \\ -0.2307 \end{bmatrix} u(t) \begin{bmatrix} 0.3331 & 0.0717 & 0.0416 & 0.0382 \\ 0.2357 & 0 & 0.0478 & 0.0555 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0018 & 0.0009 & -0.0139 & -0.0278 \end{bmatrix} y(t)$$

$$\hat{x}(t) = z(t) + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} y(t) \quad (3.14)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{x}(t)$$

III.4.2 Résultats de simulation

Dans les simulations suivantes nous avons injecté les défauts actionneur représentés dans la figure suivante :

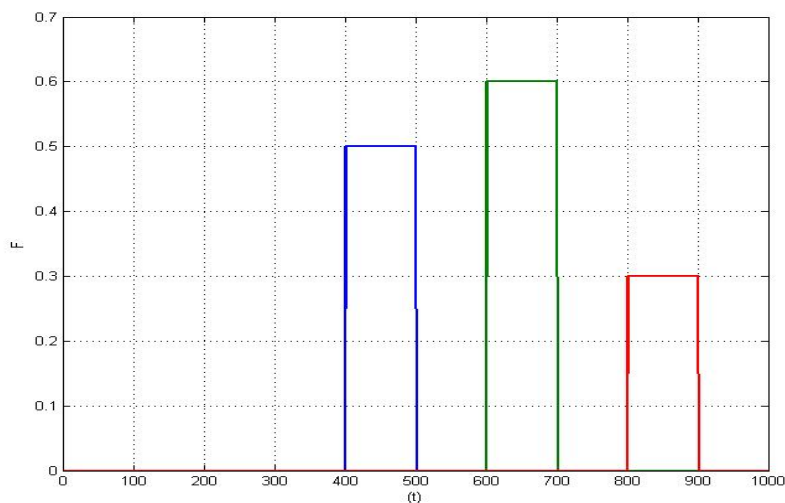
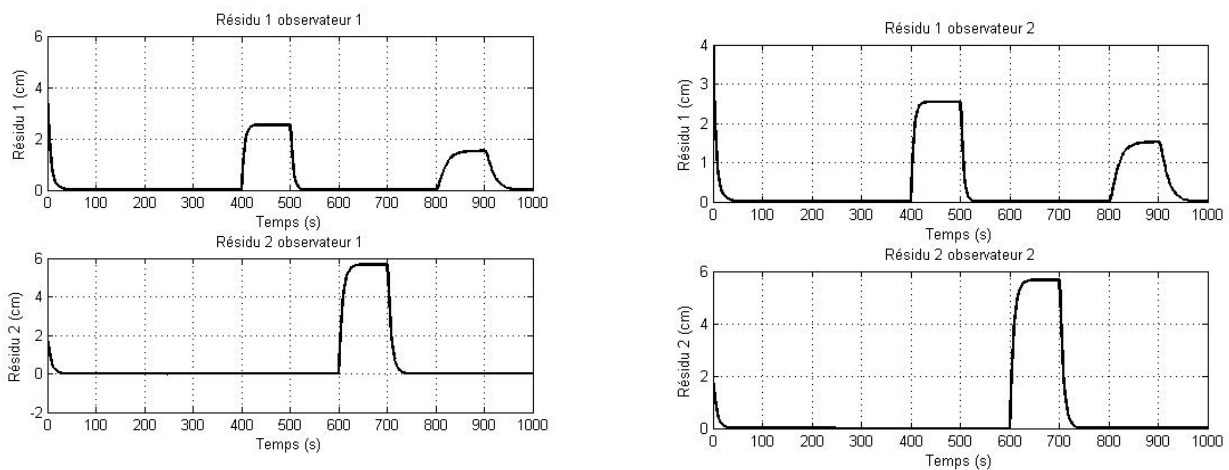


Figure III.7– Les défauts actionneur

La Figure III.7 représente les différents défauts actionneur injectés à différents instants

- f1 est injecté de l'instant 400 s jusqu'à 500 s
- f2 est injecté de l'instant 600 s jusqu'à 700 s
- f3 est injecté de l'instant 800 s jusqu'à 900 s



a. Résidus premier observateur

b. Résidus deuxième observateur

Figure III.8– Evolution des résidus en présence de défauts

La figure III.8 montre l'évolution des résidus en présence de défauts, les deux résidus deviennent non nuls dès l'apparition des défauts.

III.4.3 Compensation de défaut de type actionneur

Le système s'écrit sous la forme

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.15)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

En présence de défauts et de perturbation, le modèle du système hydraulique avec défauts est défini par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Wd(t) + F_x f(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3.16)$$

La loi de commande nominale est choisie sous la forme d'un retour d'état linéaire donné par l'équation suivante :

$$u_n(t) = -Kx(t) + Qr(t) \quad (3.17)$$

Où K est un gain de retour d'état.

Et Q est un gain de poursuite

III.4.4 Résultats de simulation

Pour compenser l'effet des défauts on propose de reconfigurer loi de commande nominale.

La nouvelle loi de commande choisi s'écrit :

$$u(t) = u_n(t) + u_{\text{add}}(t) \quad (3.18)$$

u_{add} Sera choisi d'une manière a compenser l'effet des défauts actionneurs, elle doit être choisie d'une façon à rendre la dynamique de système défectueux assez proche que celle du système nominal, en d'autre terme : u_{add} doit vérifier l'équation suivante:

$B_f^+ u_{\text{add}} + F_x f(t) \simeq 0$, alors:

$$u_{\text{add}} = -B_f^+ F_x f(t), \text{ avec:} \quad (3.19)$$

$$B_f^+ = (B_f^T B_f)^{-1} B_f$$

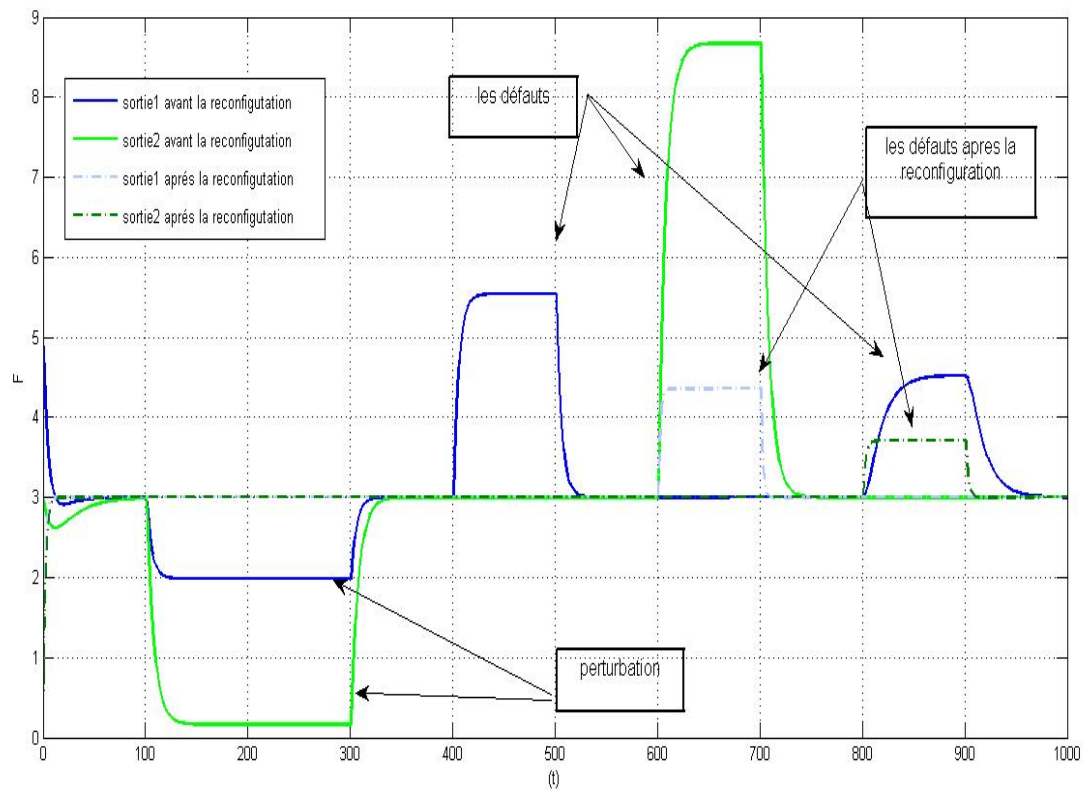


Figure III.9– l'effet de la reconfiguration sur le système soumis aux défauts

III.4.4.1 Interprétation générale :

la figure III.9 montre l'évolution des sorties en présence de défauts avant reconfiguration (traits continus) et après reconfiguration (traits discontinus)

- La reconfiguration apporte une amélioration notable à la robustesse du système face aux défauts et perturbations.
- Les défauts observés avant la reconfiguration sont largement réduits après la reconfiguration, ce qui suggère que la reconfiguration a permis d'optimiser ou de renforcer certaines caractéristiques critiques du système.
- La perturbation continue d'affecter le système, mais son impact est moindre après la reconfiguration.

III.5 Conclusion

Après avoir présenté le modèle du système hydraulique à quatre réservoirs couplés, nous avons estimé les états du système considéré en utilisant un observateur à entrées inconnues en absence de défauts. Nous avons montré que l'observateur à entrée inconnue converge asymptotiquement et que les sorties estimées sont pratiquement confondues avec les sorties réelles.

Puis, nous avons considéré la présence des défauts actionneur, les défauts ont bien été détectés mais ne peuvent pas être localisés, car chaque défaut possède sa propre signature et un seul observateur ne peut donner qu'une seule signature

Afin d'y remédier, nous avons proposé l'utilisation d'un banc d'observateurs à entrées inconnues de structure généralisée c'est-à-dire pour chaque défaut on calcul son propre observateur (le nombre d'observateur est égale au nombre de défauts).

Après détection et la localisation des défauts, pour réduire l'effet néfaste des défauts, nous avons effectué une reconfiguration de la loi de commande pour garder les performances du système défectueux proche de celles du système nominal.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur le diagnostic et la commande tolérante aux défauts d'un système Hydraulique à quatre réservoirs.

Dans le premier chapitre nous avons exposé brièvement les concepts fondamentaux liés au diagnostic et à la commande tolérante aux défauts

Dans le deuxième chapitre nous avons donné abordé la modélisation dynamique du système hydraulique à quatre réservoirs sous forme non linéaire et linéarisé. Un régulateur PID a été conçu et simulé pour contrôler le niveau des réservoirs, démontrant une amélioration notable de la rapidité et de la précision du système, même en présence de perturbations.

Dans le troisième chapitre, nous avons appliqué l'observateur à entrée inconnue pour le diagnostic de défauts du système hydraulique à quatre réservoirs. Dans un premier temps nous avons synthétisé un observateur à entrée inconnue sans présence de défauts et avec présence d'une perturbation. la convergence de l'observateur est montré par simulation sur le modèle du système à quatre réservoirs. En injectant des défauts actionneur sur l'entrée du système, on remarque que l'observateur reconstruit bien les états du système en présence de défauts. L'observateur à entrée inconnue synthétisé détecte avec succès les défauts actionneur. Pour l'étape de localisation un banc de deux observateurs à entrées inconnues est conçu. La structure choisie est la structure GOS. Après détection et localisation de défauts, on procède à la compensation de l'effet du défaut en intégrant une loi de reconfiguration à la loi de commande nominale. On remarque que la loi de commande reconfigurée améliore les résultats par rapports à la loi de commande nominale dans le cas où il y' a présence de défauts. comme perspective on propose d'utiliser les observateurs non linéaires à mode glissant et à grand gain pour la détection de défaut du système non linéaire à quatre réservoir.

Résumé

Ce mémoire de fin d'étude porte sur le diagnostic et la commande tolérante aux défauts d'un système hydraulique à quatre réservoirs. Après une brève description du système à quatre réservoirs, son modèle mathématique non linéaire et linéarisé sont calculés. un régulateur PID est synthétisé pour améliorer les performances du système. Afin de détecter les défauts actionneurs, l'observateur à entrées inconnues est choisit comme générateur de résidus. Après détection et localisation des défauts, une loi de commande reconfigurable est proposée pour améliorer les performances dégradées du système en présence de défauts. les résultats sont illustrés par simulation.

Mots clés: système à quatre réservoirs, commande tolérante aux défauts, observateur à entrées inconnues, PID.

Anglais :

This end-of-study thesis focuses on the fault diagnosis and fault-tolerant control of a four-tank hydraulic system. After a brief description of the four-tank system, A nonlinear and linearized mathematical models are established. A PID controller is designed to improve the system's performance. To detect actuator faults, the Unknown Input Observer (UIO) is selected as the residual generator. After fault detection and localization, a reconfigurable control law is proposed to enhance the degraded system performance in the presence of faults. The results are illustrated through simulation.

Arabic

تتناول هذه مذكرة نهاية التخرج موضوع التشخيص والتحكم المتحمل للأعطال في نظام هيدروليكي مكون من أربعة خزانات. بعد وصف موجز للنظام، يتم حساب النموذج الرياضي غير الخطي والمبسط خطياً. تم تصميم منظم PID لتحسين أداء النظام. وللكشف عن أعطال المشغلات، تم اختيار المراقب ذو المدخلات المجهولة كمولد لبواقي الأعطال. بعد اكتشاف الأعطال وتحديد مواقعها، تم اقتراح قانون تحكم قابل لإعادة التشكيل لتحسين أداء النظام المتدهور في وجود الأعطال. تم توضيح النتائج من خلال المحاكاة.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Frank, P. « Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge based redundancy a survey ». *Automatica*, Vol 26, N°. 3, pages 459-474.1990.
- [2] Patton, R.J., Chen, J., et Nielsen, S. B. « Model-based methods for fault diagnosis: Some guidelines ». *Transactions. of the institute of Measurement and Control*, Vol.17, N°2, pages 73–81.1995
- [3] Chen, J. et Patton, R. « Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems ». Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, ISBN:0-7923-8411-3.1999.
- [4] Q. ZHANG. « Contribution à l'élaboration d'algorithme d'isolation et d'identification de default dans un système non linéaire ». Thèse institut national des sciences appliqué de Toulouse .2006.
- [5] IKNI. S. « Diagnostic de Pannes et Commande Tolérante Aux Fautes D'un Robot Manipulateur Télé-Opéré ». Mémoire Diplôme de Magistère. Univ. Batna. 2011.
- [6] : M. STAROSWIECKI and A.L. GEHIN. « From control to supervision», In *Annual Reviews in Control*, Vol 25, pp 1-11, 2001.
- [7] HARKET. F. I. et KHELFAOUI. A. « Diagnostic de Défauts du Système Hydraulique Cinq Cuves », MEMOIRE MASTER, Univ.ouargla, 2017.
- [8] Bishop, C. M. « Pattern Recognition and Machine Learning ». Springer.2006.
- [9] Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., & Staroswiecki, M. « Diagnostics and Fault-Tolerant Control ». Springer.2006.
- [10] Patton, R. J., Frank, P. M., & Clark, R. N. « Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems ». Springer. 2000.
- [11] Isermann, R. «Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance ». Springer. 2005.
- [12] Abdi, H., & Williams, L. J. « Principal component analysis ». *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(4), 433–459. 2010.
- [13] Jain, A. K., Duin, R. P. W., & Mao, J. « Statistical pattern recognition: A review. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* », 22(1), 4–37. 2000.

- [14] Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. « Deep Learning. MIT Press ». 2016.
- [15] Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. « Discrete-Time Signal Processing ». Pearson Education. 2010.
- [16] N.S.Boukhalfa. « Synthèse d'observateurs non linéaires , Application au diagnostic de défauts ». Thèse magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi- Ouzou. 2011.
- [17] Kramer, A. D. « Probabilistic Reasoning for Complex Systems: Influence Diagrams and Bayesian Belief Networks ». IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 20(2), 296–310. 1990.
- [18] Simon, D. « Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches ». Wiley. 2006.
- [19] Ljung, L. « System Identification: Theory for the User ». Prentice Hall.1999.
- [20] Sihali. M. « Diagnostic de défauts à base d'observateurs à entrées inconnues : Application au système hydraulique ». Mémoire de master, UMMTO. 2019.
- [21] AIT GHERBI.Y. et RABHI.M. « Synthèse d'observateurs à entrées inconnues pour les systèmes linéaires continus Application à la détection de fuite d'un système hydraulique » Mémoire de Master. UMMTO, 2016.
- [22] SALHI.M. W. « Observateurs et détection de défauts ». Mémoire de Master. Univ. annaba, 2019.
- [23] O. ADROT. « Diagnostic à base de modèles incertains en utilisant l'analyse par intervalle l'approche bornante ». Thèse, institut National Polytechnique de lorraine,2004
- [24] OUBABAS. H. « Contribution au diagnostic et à la commande tolérante aux fautes par l'approche ensembliste ». THÈSE DE DOCTORAT. UMMTO. 2019.
- [25] Patton. R. J. « Fault tolerant control systems : the 1997 situation ». proc of the IFAC symposium Safe Process 97, volume2, pages 1033-1054. Hull, UK.
- [26] OUBABAS. H. « Etude comparative de méthodes de reconfiguration de commande ». «Mémoire de Magister, UMMTO, 2008.
- [27] Rodrigues. M. « Diagnostic et commande active tolérante aux défauts appliqués aux systèmes décrits par des multi-modèles linéaires ». Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1 ,2005.

- [28] Boumedyen. B. « Contribution à la tolérance active aux défauts des systèmes dynamiques par gestion des références ». Thèse Doctorat. Université Henri Poincaré - Nancy I, 2011.
- [29] Gao, Z. et Antsaklis, P. « Stability of the pseudo-inverse method for reconfigurable control ». *International Journal of Control*, 53:717–729. 1991.
- [30] Staroswiecki, « M. Fault tolerant control: The pseudo-inverse method revisited ». In *Proc. of the 16th Triennial IFAC World Congress, Prague, Czech Republic*. 2005.
- [31] : P.E. DUMONT, « Tolérance active aux fautes des systèmes d'instrumentation », Thèse de doctorat, Ecole doctorale sciences pour l'ingénieur de Lille, 2005.
- [32] Looze, D., Weiss, J., Eterno, J. et Barrett, N. « An automatic redesign approach for restructurable control systems ». *IEEE Control Systems Magazine*, 5:16–22. 1985.
- [33] Anderson, B. et Moore, J. « Optimal control - Linear quadratic methods ». Prentice. 1989.
- [34] Jones, H. « Fault Detection and Isolation: A Review of Current Trends ». *Journal of Process Control*, 12(7), 825–836. 2002.
- [35] Kanev, S., Verhaegen, M., & Bosgra, O. H. « Fault-Tolerant Control: A Survey of Approaches and Applications ». *Annual Reviews in Control* , 28(2), 191–204. 2004.
- [36] Assaq. K. « PID Based Quadruple Tank System level control ». DEPARTMENT OF INSTRUMENTATION ENGINEERING Kokrajhar. India.
- [37] Serkan. Ö, Tolgay. K and Mehmet. A. Modelling, « Simulation and Control of Quadruple Tank Process » Conference Paper, November 2017. Electrical and electronics Engineering Department, Gaziantep University, Gaziantep, Turkey.