

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information
et de la Communication
Département d'Electronique et Des Télécommunications



Mémoire
MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique

Présenté par : KAFI SYEF EDDINE

Thème

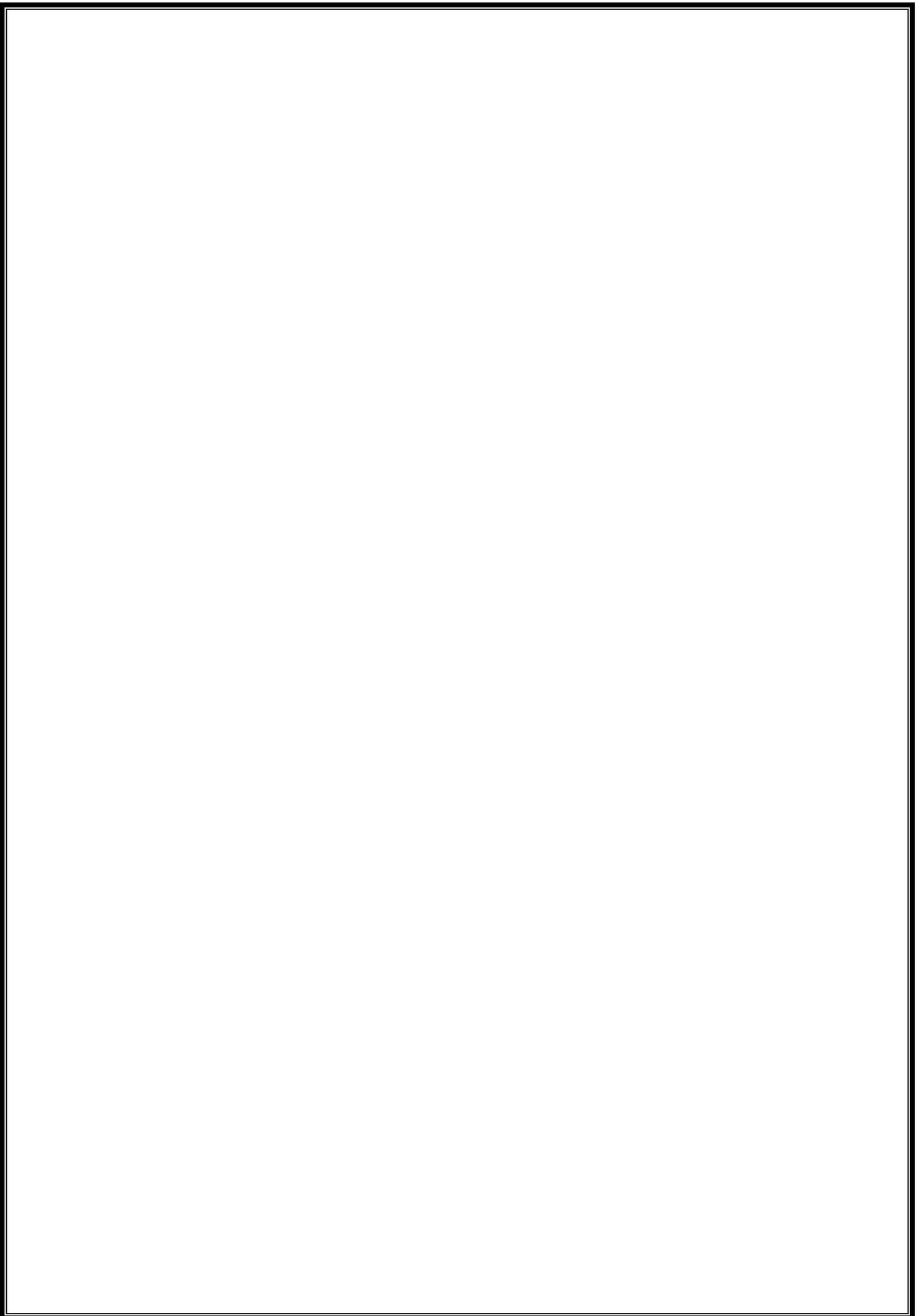
***Observateur non linéaire:
Application au diagnostic de pannes dans
les robots manipulateurs***

Soutenu le :07/06/2015

Devant le jury :

M.DJEDDI ABDELGHANI	M.A.A	Président	UKM Ouargla
Mme. OUARHLENT.S	M.A.A	Encadreur	UKM Ouargla
Mme. HOUDA.K	M.A.A	Encadreur	UKM Ouargla
M.HAMZA AZZEDINE	M.A.A	Examineur	UKM Ouargla
M. HAMIDA MED. A	M.C.B	Examineur	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2014 /2015



REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent d'abord à ALLAH le tout puissant et à son prophète MOHAMMED (paix et salut sur lui) pour les chances qui me sont offertes pour réaliser ce travail.

À Mme. OUARHLENT .S directrice de mémoire, Vous m'avez accordée votre confiance en acceptant de diriger ce mémoire, malgré la distance et les multiples occupations qui sont les vôtres. Votre ouverture d'esprit et surtout l'intérêt que vous portez à la science font de vous une source intarissable à laquelle tout étudiant devrait s'abreuver. Trouver ici le témoignage de ma profonde gratitude et de mes sincères remerciements.

A toute la promotion AUTOMATIQUE 2014 - 2015,

Au président de jury de notre mémoire, Aux membres du jury,

A tous ceux qui de près ou de loin ont apporté leur contribution à la réalisation de travail, je vous prie de trouver l'expression de ma profonde reconnaissance

DEDICACE

Je dédie ce travail :

A ma mère : Feue Mme LABOTI FOUZAI pour m'avoir donnée la vie et la joie de vivre. Ta bonne éducation, tes conseils et tes bénédictions n'ont jamais fait défaut, que Dieu te protège.

A mon père : Mr MOHAMMED TAHRE en signe de reconnaissance de l'immense bien que vous avez fait pour moi concernant mon éducation qui aboutit aujourd'hui à la réalisation de cette étude. Recevez à travers ce travail, toute ma gratitude et mes profonds sentiments. Que Dieu le tout puissant soit à vos côtés et vous accorde une meilleure santé (amen).

Et à ma grande famille a mes frères FAROUK, RACHID, MOHAMED SAGHIR, MOHAMED LARBI, SALAH EDDINE, AZIZA, NADIRA, ZOUHERA et HADJR

A ma très chère fiancé : Mr RCIQUI FATIMA ZAHRA, reçois à travers ce travail tout mon respect, ma gratitude.

Et à toute mes amies ma profonde reconnaissance et particulièrement MAHDI, YUCEF, KADA, TARAK, AHMED, IMAD, WALIDE, BAKI, HOUSSAM, BAHI.

Résumé

Liste des figures

Introduction générale..... 01

Chapitre I :

Observateurs des systèmes linéaires et non linéaires

I.1 -	Introduction.....	03
I.2 -	Observabilité.....	03
I.2.1 -	Observabilité des systèmes linéaires.....	05
I.2.2 -	Observabilité des systèmes non linéaires.....	06
I.3 -	Observateurs des systèmes linéaires.....	09
I.3.1-	Observateur de Luenberger.....	09
I.3.2-	Filtre de Kalman.....	10
I.3.3-	Observateur à entrée inconnue.....	10
I.4 -	Observateurs des systèmes non linéaires.....	12
I.4.1 -	Observateur de Luenberger étendu.....	12
I.4.2 -	Filtre de Kalman Etendu (EKF).....	12
I.4.3 -	Observateurs à grand gain	13
I.5 -	Observateurs à mode glissant.....	14
I.5.1 -	Observateurs à mode glissant des systèmes linéaires.....	16
I.5.2 -	Observateurs à mode glissant sous forme triangulaire.....	19
I.6 -	Conclusion.....	22

Chapitre II :

Diagnostic des défauts pour les robots manipulateurs

II.1 -	Introduction.....	23
II.2 -	Définitions et généralités.....	23
II.2.1 -	Termes généraux.....	23
II.2.2 -	Fonctions.....	25
II.3 -	Procédure de la détection et d'isolation des défauts.....	26
II.4 -	Méthodes de diagnostic.....	26
II.5 -	Diagnostic des défauts pour les robots manipulateurs.....	28
II.6 -	Type de défauts.....	29
II.7 -	Modélisation des défauts.....	30
II.8 -	Modélisation des perturbations.....	30
II.9 -	Défauts des robots manipulateurs.....	31
II.10 -	Modélisation du robot manipulateur en vue de son diagnostic.....	32
II.10.1 -	Modèle du robot sain.....	32
II.10.2 -	Modélisation des défauts.....	32

Sommaire

II.10.3 -	Défauts composants et défauts actionneurs.....	33
II.11 -	Commande PID du robot.....	34
II.12 -	Exemple d'un bras manipulateur à un degré de liberté.....	35
II.13 -	Application de l'Observateur pour un robot manipulateur 1ddl.....	37
II.13.1 -	Mise sous forme triangulaire du modèle dynamique.....	37
II.13.2 -	Observation en mode glissant sous forme triangulaire.....	37
II.14-	Conclusion.....	38

Chapitre III :

Tests et validation

III.1-	Introduction.....	39
III.2-	Conclusion.....	49
	Conclusion générale.....	50

Bibliographie

Annexe

Résumé : Dans ce mémoire nous avons appliqués la méthode de diagnostic à base d'observateur à mode glissant sous forme triangulaire « étape par étape » pour la détection des défauts actionneurs et composants des robots manipulateurs (1ddl). Les résultats de simulation montrent que l'application de cette méthode permet la détection de différents types de défauts (Actionneurs et composants) et à temps réel. Des simulations ont été effectuées sous MATLAB/ SIMULINK afin de tester les performances de la commande PID et l'observateur.

Mots clés : Observateurs, Observateur à mode glissant sous forme triangulaire .La détection de défauts. La modélisation dynamique d'un bras manipulateur. la commande PID

Abstract : In this memory we applied the method of diagnosis based on observer to mode slipping in triangular form "stage by stage" for detection of the defects actuators and components of the robots manipulators (1ddl). The results of simulation show that the application of this method allows the detection of different types of defects (Actuators and components) and with real time. Simulations were carried out under MATLAB/SIMULINK in order to test the performances of order PID and the observer.

Key words : Observability .Sliding mode observer .Triangular Sliding mode . Default detection .The dynamic modeling of an arm manipulator. The PID control.

Liste des figures

Figure I.1	Schéma d'un observateur.....	04
Figure I.2	Schéma de principe d'un observateur.....	05
Figure I.3	Schéma structurel de l'observateur de Luenberger.....	09
Figure I.4	Schéma fonctionnel d'un observateur à mode glissant.....	15
Figure II.1	Procédure de détection et d'isolation des défauts	26
Figure II.2	Classifications des méthodologies de diagnostic industriel.	27
Figure II.3	Bras manipulateur robotisé dans une chaîne de production.....	28
Figure II.4	28
Figure II.5	Types de défauts.....	29
Figure II.6	Commande PID.....	34
Figure II.7	Système articulé à un degré de liberté de masse m.....	35
Figure III.1	Position articulaire (réelle et désirée).....	30
Figure III.2	Vitesse articulaire (réelle et désirée).....	39
Figure III.3	Erreurs de positions articulaires.....	40
Figure III.4	Erreurs de vitesses articulaires.....	41
Figure III.5	Représentation de résidu : Absence des défauts et d'incertitudes.....	41
Figure III.6	Représentation de position : Absence des défauts et d'incertitudes.....	42
Figure III.7	Représentation de vitesse : Absence des défauts et d'incertitudes.....	42
Figure III.8	Représentation des résidus : Absence de défauts mais présence d'incertitudes.....	43
Figure III.9	Représentation des positions : Absence de défauts mais présence d'incertitudes.....	44
Figure III.10	Représentation des vitesses : Absence de défauts mais présence d'incertitudes.....	44
Figure III.11	Représentation des résidus : Apparition de défaut actionneur à $t = 4$ sec.....	45
Figure III.12	Représentation des positions : Apparition de défaut actionneur à $t = 4$ sec.....	46
Figure III.13	Représentation des vitesses : Apparition de défaut actionneur à $t = 4$ sec.....	46
Figure III.14	Représentation des résidus : Apparition de défauts composants à $t = 3.1$ sec.....	47
Figure III.15	Représentation des positions : Apparition de défauts composants à $t = 3.1$ sec.....	48
Figure III.16	Représentation des vitesses : Apparition de défauts composants à $t = 3.1$ sec.....	48

Introduction générale

La complexité croissante des systèmes rencontrés dans l'industrie a sans aucun doute généré de nouveaux problèmes dont la résolution constitue autant de défis à relever par l'automaticien. La conduite de ces systèmes requiert, d'une part, des stratégies de commande de plus en plus sophistiquées de façon à améliorer et/ou à maximiser les performances du système et, d'autre part, l'intégration de modules de surveillance en mesure d'assurer un bon fonctionnement et la sécurité des opérateurs. Les solutions apportées à ces deux problèmes passent souvent par une phase de connaissance de l'état de fonctionnement du système par le biais d'une estimation entière ou partielle de ses variables d'état et éventuellement des grandeurs perturbatrices (défauts, entrées inconnues, etc.). En effet, de nombreuses techniques de synthèse de lois de commande sont conçues en supposant que l'état du système est accessible à la mesure. Or, sur un plan pratique, divers facteurs physiques, techniques ou économiques rendent particulièrement difficile voire impossible la mesure de la totalité des variables du système, d'où le besoin de procéder à une estimation des variables non mesurables. Dans le contexte de la surveillance, l'estimation de l'état du système est une source de redondance analytique. Elle permet de générer des symptômes de défaillance du système à partir d'un test de cohérence entre des signaux extraits du système qui renseignent sur son comportement réel et des signaux estimés qui traduisent le comportement attendu. Tout écart non permis entre ces signaux révèle la présence éventuelle de défauts affectant le fonctionnement du système, défauts qu'il convient ensuite d'estimer [1].

D'une façon générale, l'estimation de l'état en temps réel d'un système s'opère par le biais d'un système dynamique auxiliaire, couramment appelé estimateur d'état ou observateur. Il est conçu sur la base d'un modèle capable de représenter avec précision le comportement réel du système. La complexité de ce modèle doit en outre demeurer admissible et ce, de façon à rendre la tâche de synthèse et de mise en œuvre de l'observateur la plus aisée possible (étude de sa stabilité et de la convergence de l'erreur d'estimation, minimisation du volume de calculs, etc.).

La technique d'observations basée sur les modes glissants permet la synthèse d'observateurs pour de nombreuses classes de systèmes non linéaire. L'observateur mode glissant sous forme triangulaire est autre observateur très répondu dans la littérature, il permet d'estimer conjointement les paramètres et les états de système.

A cause de l'intérêt considérable porté pour le diagnostic, les orientations des travaux de recherche sur l'estimation d'état des systèmes non linéaires vers des objectifs de diagnostic sont de plus en plus importants. Avant l'apparition des techniques utilisant le modèle du processus où les informations disponibles sur le processus, le diagnostic notamment la détection de défauts, se faisait principalement en utilisant la redondance matérielle qui consiste à doubler, tripler certains composants. Cette redondance matérielle est efficace et rapide mais s'avère coûteuse et encombrante. Pour résoudre ce problème plusieurs méthodes de diagnostic ont été proposées : diagnostic par traitement de signal, diagnostic par estimation paramétrique, diagnostic à base d'observateurs ...etc) [8].

Organisation

Ce mémoire, se décompose en trois chapitres, est organisé de la façon suivante :

Le premier chapitre a pour objectif la présentation des différentes observateurs (linéaire et non linéaire) existants dans la littérature et leurs méthode de synthèse. L'algorithme de synthèse d'observateur mode glissant sous forme triangulaire sera élaboré et validé sur un bras manipulateur à 1ddl.

Dans la première partie de chapitre 2, on donne des définitions des mots clés qui sont utiles pour la compréhension de diagnostic de pannes. La deuxième partie est consacré à la présentation des différents types de défauts rencontrés dans les systèmes robotisés et traite le problème de génération et d'évaluation des résidus pour résoudre le problème FDI.

Enfin, des simulations seront effectuées sur le modèle du robot manipulateur à un degré de liberté.

Une conclusion générale donnera une synthèse du travail effectué et résumera les principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives envisagées.

Chapitre I :

Observateurs des systèmes linéaires et non linéaires

I.1- Introduction

La disponibilité de toutes les variables d'état pour la mesure directe est rarement vérifiée dans la pratique. Il existe dans la plupart des cas un vrai besoin d'une estimation fiable des variables non mesurées, particulièrement quand elles sont employées pour la synthèse de lois de commande ou pour la surveillance des processus. En effet, l'état d'un système peut correspondre à une grandeur physique que l'on ne peut pas toujours mesurer directement ; l'élaboration d'une loi de commande ou la détermination d'une défaillance d'un composant d'un système passent souvent par l'accès à la valeur d'un ou plusieurs de ses états.

Pour cela, il s'avère nécessaire de concevoir un système auxiliaire appelé, observateur, qui se charge de reconstruire les états non mesurables en exploitant les informations disponibles, à savoir le modèle dynamique du système, ses sorties mesurées et éventuellement ses entrées [3].

Contrairement au problème de synthèse d'observateurs d'état des systèmes linéaires qui a été entièrement résolu. Le cas des systèmes non linéaires est plus difficile et beaucoup moins systématique. C'est la raison pour laquelle, de nombreux travaux ont abordé ce problème, dans la littérature, en se basant sur des classes spécifiques de systèmes non linéaires [2].

Dans cette section nous allons présenter quelques méthodes de synthèse d'observateurs de systèmes linéaires et non linéaires. Mais auparavant, nous allons parler d'un concept important dans le domaine de la reconstruction d'état, qui est celui de l'observabilité.

I.2-Observabilité

L'observabilité d'un système dynamique est un concept très important dans le domaine d'estimation de l'état. En effet, pour reconstruire les états inaccessibles d'un système, il faut savoir, a priori, si les variables d'état sont observables ou non.

L'observabilité d'un système est la propriété qui permet de dire si l'état peut être déterminé uniquement à partir de la connaissance des signaux d'entrées et de sorties [2].

En général, pour des raisons de réalisation technique, de coût, etc. ..., la dimension du vecteur de sortie est inférieure à celle de l'état. Ceci entraîne qu'à l'instant donné t , l'état $x(t)$ ne peut pas être déduit algébriquement de la sortie $y(t)$ à cet instant. Par contre, sous des conditions d'observabilité qui seront explicitées plus loin, cet état peut être déduit de la connaissance des entrées et sorties sur un intervalle de temps passé: $u([0,t],y[0,t])[2]$.

Définition 4.1: on appelle observateur (ou reconstituteur d'état) d'un système dynamique (S) [2]:

$$(S): \begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (I.1)$$

Un système dynamique auxiliaire O dont les entrées sont constituées des vecteurs d'entrée et de sortie du système à observer et dont le vecteur de sortie $\hat{x}(t)$ est l'état estimé :

$$O: \begin{cases} \dot{z}(t) = \hat{f}(z(t), u(t), y(t)) \\ \hat{x}(t) = \hat{h}(z(t), u(t), y(t)) \end{cases} \quad (I.2)$$

Telle que l'erreur entre le vecteur d'état $x(t)$ et $\hat{x}(t)$ tend asymptotiquement vers zéro.

$$\|e(t)\| = \|x(t) - \hat{x}(t)\| \rightarrow 0 \text{ quand } t \rightarrow \infty$$

Le schéma d'un tel observateur est donné sur la figure (I.1).

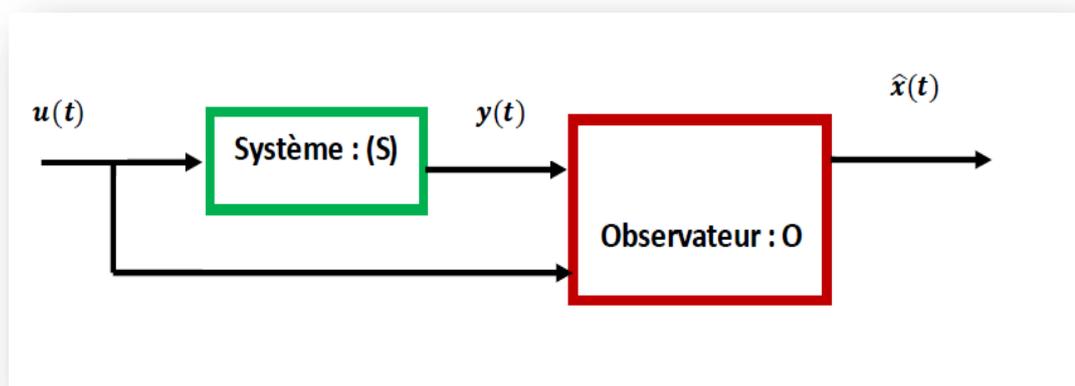


Figure I.1. Schéma d'un observateur

L'observateur est constitué de deux parties [2] :

- Un simulateur (estimateur) du système réel caractérisé par les matrices (A, B, C) , ayant comme entrées u et y et comme sortie \hat{y} .
- Un correcteur réalisant une contre-réaction fonction de l'écart entre la sortie y et son estimée \hat{y} . Ce correcteur permet d'assurer la convergence de l'estimation de l'état x vers l'état \hat{x} , L est appelé le gain de l'observateur [5].

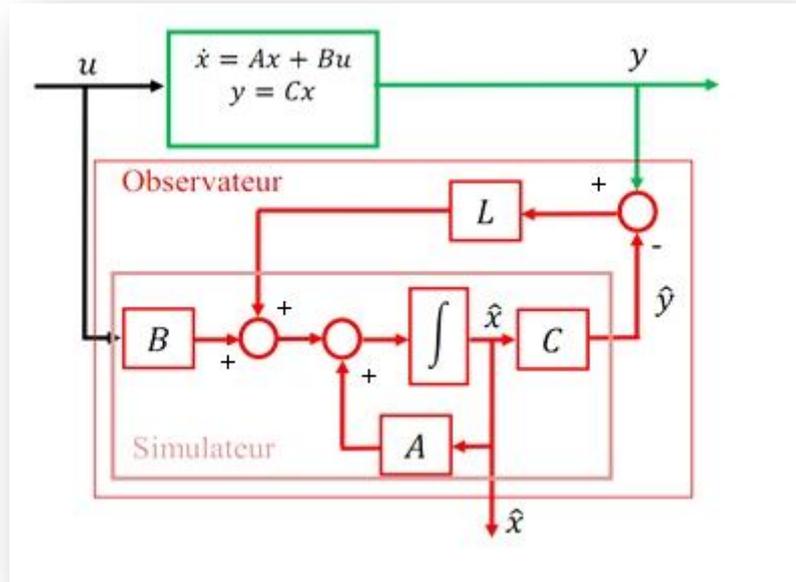


Figure I.2 : Schéma de principe d'un observateur

L'observabilité caractérise la propriété de pouvoir récupérer par une combinaison des mesures et de leurs dérivées toutes les grandeurs d'un système.

I.2.1 -Observabilité des systèmes linéaires

Soit un système continu décrit par l'équation d'état suivante:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (I.3)$$

Ou les vecteurs $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$ et $y(t) \in R^p$ représentent respectivement l'état, la commande et la sortie du système. Les matrices A, B et C sont des matrices constantes de dimensions appropriées. L'observabilité du système linéaire (I.3) est garantie si et seulement si :

$$rang(O) = rang \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix} = n \quad (I.4)$$

Par conséquent le système linéaire (I.3) est observable, si le rang de la matrice d'observabilité O est égal à la dimension n de ce système [6]. Dans le cas où le rang de la matrice O est inférieur à n on parle alors, d'observabilité partielle.

I.2.2 -Observabilité des systèmes non linéaires

Pour les systèmes non linéaires, étant donné l'espace de l'état $x \in R^n$ et l'ensemble U des entrées, la notion d'observabilité est basée sur la possibilité de différencier deux conditions initiales distinctes. On parlera ainsi de la distinguabilité d'un couple de conditions initiales [7] [8].

On considère le système non linéaire donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{I.5})$$

Où les vecteurs $x(t) \in R^n, u(t) \in R^n$ sont respectivement le vecteur d'état et de commande.

Définition : (Distinguabilité) [4] : Deux états initiaux $x_0^1, x_0^2 \in X$ tel que $x_0^1 \neq x_0^2$ sont dits distinguables dans X si $\exists t \geq 0$ et entrée admissible $u : [0, t] \rightarrow U$ telle que les trajectoires des sorties $y(t, x_0^1, u(t))$ et $y(t, x_0^2, u(t))$, issues, respectivement de x_0^1 et x_0^2 , restent dans X . $[0, t]$ et vérifient $y(t, x_0^1, u(t)) \neq y(t, x_0^2, u(t))$. Dans ce cas, on dira que u distingue x_0^1, x_0^2 dans X .

Définition : (Observabilité et observabilité locale faible) [4] : Un système est observable en $x_0^1 \in X$, si tout autre état $x_0^2 \neq x_0^1$ est distinguable de x_0^1 dans X .

Un système est globalement observable s'il est distinguable en tous points de X . Un système est localement faiblement observable en $x_0^1 \in X$, s'il existe un voisinage $X'(x_0) \subset X$ contenant x_0^1 , tel que pour tout voisinage $X'' \subset X'(x_0^1)$ de x_0^1 , pour tout point $x_0^2 \in X''(x_0^2)$, les couples (x_0^1, x_0^2) sont distinguables et les trajectoires $y(t, x_0^1, u(t))$ et $y(t, x_0^2, u(t))$ évoluent à l'intérieur de $X''(x_0^1)$.

Dans la pratique, ces notions sont relativement difficiles à vérifier et souvent on fait recours à la linéarisation du système au tour d'un point d'équilibre pour s'affranchir de l'observabilité du système au voisinage de ce point d'équilibre.

Définition : (Observabilité au sens du rang) : [4]

Rappelons qu'un champ de vecteurs f peut être interprété selon les besoins de deux manières:

1^{eme} - Comme une application qui à tout point x assigne un vecteur $f(x)$. Dans ce cas on l'écrit dans la base canonique sous la forme suivante:

$$f(x) = \begin{pmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{pmatrix} \quad (\text{I.6})$$

On dit que les f_i sont ses composantes. Sous cette forme on dit aussi qu'il régit un système d'équations différentielles, dont les courbes tangentes (t) vérifient :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x(t)) \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{I.7})$$

On dit que $x(t)$ est une courbe intégrale de f .

2^{eme} - Comme une dérivation qu'il faudra écrire sous la forme suivante:

$$f = f_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + f_2 \frac{\partial}{\partial x_2} + \dots + f_n \frac{\partial}{\partial x_n} \quad (\text{I.8})$$

Sous cette forme il s'applique à une fonction réelle $h(x)$ comme suit :

$$L_f h = f_1 \frac{\partial h}{\partial x_1} + f_2 \frac{\partial h}{\partial x_2} + \dots + f_n \frac{\partial h}{\partial x_n} \quad (\text{I.9})$$

Cette nouvelle fonction $L_f h$ s'appelle la dérivée de Lie de h dans la direction de f .

Si $f = \frac{\partial h}{\partial x_i}$, alors $L_f h = \frac{\partial h}{\partial x_i}$ et on reconnaît les dérivations partielles. Il est facile de voir que :

$$L_f h = dh(f) = \nabla h \cdot f = \frac{dy}{dt} := y \quad (\text{I.10})$$

Où dh est la différentielles de h , et $\nabla h \cdot f$ est le produit scalaire du gradient ∇h de h avec.

Définition 2.2. Considérons le système dynamique de la forme (I.5). On dit que la paire (f, h) est observable au sens du rang si la différentielle de la sortie h avec les différentielles de ses dérivées de **Lie** successives dans la direction de f jusqu'à l'ordre $n-1$ sont indépendante (sur un voisinage de 0). C'est-à-dire que :

$$\text{Rang}\{dh, dL_f, \dots, dL_f^{n-1}h\}^T = n \quad (\text{I.11})$$

Ou l'écriture de $dL_f^k h$ ici est donnée par le co-vecteur :

$$dL_f^k h = \left(\frac{\partial dL_f^k h}{\partial x}, \frac{\partial y}{\partial x}, \dots, \frac{\partial y}{\partial x} \right) \quad (\text{I.12})$$

On remarque que $dL_f^k h = y^{(k)}$ est la dérivée $k^{\text{ième}}$ de la sortie. Donc, sous la condition du rang (I.9) ci-dessus l'application suivante :

$$x \rightarrow (y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}) \quad (\text{I.13})$$

Est un difféomorphisme local. Plus précisément, ce difféomorphisme est l'inverse de l'application suivante :

$$\begin{pmatrix} y \\ \dot{y} \\ \vdots \\ y^{(n-1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \\ \vdots \\ L_f^{(n-1)} h(x) \end{pmatrix} = \psi^{-1}(x) \quad (\text{I.14})$$

C'est-à-dire l'état x s'écrit (localement) en fonction de la sortie y et de ses dérivés successives [3].

$$x \rightarrow \psi(y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}) \quad (\text{I.15})$$

Une solution simple et optimale au problème de l'estimation de l'état des systèmes linéaires a été proposée par Luenberger dans le cadre déterministe, et par Kalman dans le cadre stochastique. Dans les deux cas, on considère le modèle dynamique du système linéaire défini par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Lw(t) \\ y(t) = Cx(t) + v(t) \end{cases} \quad (\text{I.16})$$

Où $x(t) \in R^n, u(t) \in R^m, y(t) \in R^p, w(t) \in R^r$ et $v(t) \in R^p$ sont deux bruits blancs gaussiens d'espérance nulle, de covariances respectives Q et R . Ces bruits sont supposés non corrélés. Les matrices du système sont de dimensions appropriées, et les conditions initiales sont définies par $x(0) = x_0$.

I. 3 -Observateurs des systèmes linéaires

I.3.1- Observateur de Luenberger

La théorie de l'observation de Luenberger repose essentiellement sur des techniques de placement de pôles. On se place dans le cas déterministe, ou les bruits w et v sont nuls.

Luenberger propose l'observateur suivant pour le système [6]:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (\text{I.17})$$

La dynamique de l'erreur d'estimation $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ a pour expression :

$$\dot{e}(t) = (A - KC)e(t) \quad (\text{I.18})$$

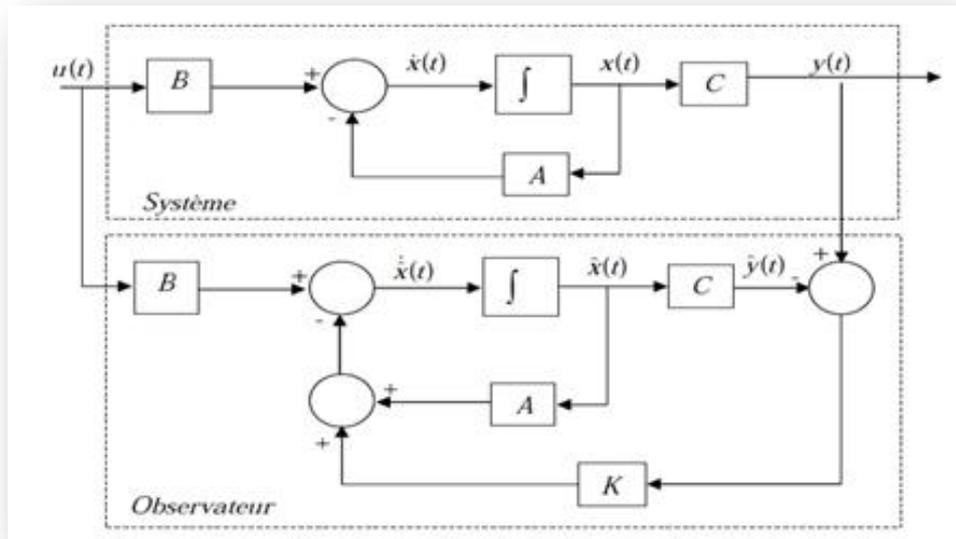


Figure I.3 : Schéma structurel de l'observateur de Luenberger

En utilisant une technique de placement de pôles, il suffit alors de choisir le gain K de l'observateur de telle sorte que les valeurs propres de la matrice $A - KC$ soient dans le demi-plan complexe gauche. Pour ce type d'observateur, une grande liberté est laissée au choix des valeurs propres, mais en pratique on choisit une dynamique d'erreur plus rapide que celle du procédé [3].

Cependant on ne peut les prendre infiniment grandes pour deux raisons essentielles : on ne peut utiliser que des gains réalisables et l'augmentation de la bande passante du reconstructeur ne permet plus de négliger les bruits qui deviennent prépondérants en hautes fréquences [4].

Il faut noter qu'en présence de bruits w, v la dynamique de l'erreur est régie par l'équation :

$$\dot{e}(t) = (A - KC)e(t) + w(t) - Kv(t) \quad (\text{I.19})$$

Cette erreur est donc sensible aux bruits par l'intermédiaire des deux fonctions de transfert

$$(sI - A + KC)^{-1}L \text{ et } (sI - A + KC)^{-1}K$$

L'étude du gain fréquentiel permet de quantifier l'influence des bruits sur l'erreur d'observation.

I.3.2-Filtre de Kalman

La théorie de l'observation de Kalman nécessite, quant à elle, la résolution d'une équation de Riccati. Kalman utilise les propriétés statistiques des bruits w et v et propose la structure d'observateur suivante :

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (\text{I.20})$$

En minimisant la matrice de covariance de l'erreur d'estimation $P = E[e(t)e(t)^T]$, on obtient l'expression du gain de l'observateur :

$$K = PC^T R^{-1} \quad (\text{I.21})$$

Où P est solution de l'équation de Riccati :

$$AP + PA - PC^T R^{-1} CP + LQL^T = 0 \quad (\text{I.22})$$

I.3.3 Observateur à entrée inconnue

La théorie d'observateur à entrée inconnue est applicable à la classe des systèmes linéaires (I.3). Seulement cette fois, les entrées inconnues interviennent dans le modèle du système :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (\text{I.23})$$

Où $d(t) \in R$ est une entrée inconnue et E est une matrice de rang plein de dimension appropriée.

Pour le système (II.23) on dit qu'un observateur est à entrée inconnue si l'erreur d'estimation tend vers zéro en présence d'entrées inconnues. Sa structure est donnée par:

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Az(t) + TBu(t) + Ky(t) \\ \hat{x}(t) = z(t) + Hy(t) \end{cases} \quad (\text{I.24})$$

Où $z(t) \in R^n$ est le vecteur d'état de l'observateur et $\hat{x}(t) \in R^n$ est le vecteur d'état estimé du système, les matrices F, T, K et H qui seront déterminées pour stabiliser l'observateur et découpler les entrées inconnues. En posant $K = K_1 + K_2$, la dérivée de l'erreur d'estimation par rapport au temps sera donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \\ \dot{e}(t) &= (A - HCA - K_1C)e - [F - (A - HCA - K_1C)]z(t) - [T - (I - HC)]Bu(t) - \\ &\quad (I - HC)Ed(t) - [K_2 - HCA - K_1C]Hy(t) \end{aligned} \quad (\text{I.25})$$

Ainsi les conditions permettant le découplage de l'entrée inconnue sont :

- $(HC - I)E = 0$
- $T = I - HC$
- $F = A - HCA - K_1C$
- $K_2 = FH$
- $K = K_1 + K_2$

Si ces conditions sont satisfaites alors l'erreur dynamique sera :

$$\dot{e}(t) = Fe(t) \quad (\text{I.26})$$

Afin que l'erreur d'estimation tende asymptotiquement vers zéro, les valeurs propres de F doivent être à partie réelle négative. Les conditions nécessaires et suffisantes pour l'existence d'un tel observateur pour un système décrit par l'équation (I.23) sont:

- $\text{Rang}(CE) = \text{Rang}(E)$
- (C, A_l) est stable, $A_l = A - E[(CE)^T CE]^{-1}(CE)^T CA$.

La première condition signifie que le nombre de lignes linéairement indépendantes de la matrice C ne doit pas être inférieur au nombre de colonnes linéairement indépendantes de la matrice E , c'est-à-dire, le nombre de mesures indépendantes doit être supérieur ou égal au nombre d'entrées inconnues à découpler.

I.4-Observateurs des systèmes non linéaires

I.4.1-Observateur de Luenbergerétendu[3][8]

L'observateur de Luenberger étendu intervient, soit au niveau du système original avec un gain constant, soit par le biais d'un changement de coordonnées avec un gain dépendant de l'état à estimer. Dans le premier cas, un modèle linéarité est nécessaire, et le gain de l'observateur est calculé par placement de pôles. Ce type d'observateur ne peut être utilisé que lorsqu'on est sûr que l'état restera au voisinage de l'état d'équilibre. Pour cette raison, l'utilisation de cet observateur peut être compromise par les instabilités qui peuvent se révéler si l'on s'éloigne du point de fonctionnement.

Dans le deuxième cas, les méthodes de changement de coordonnées ne concernent qu'une classe restreinte de systèmes non linéaires. En effet, beaucoup d'approches utilisant les changements de coordonnées nécessitent l'intégration d'un ensemble d'équations aux dérivées partielles non linéaires, ce qui est souvent très délicat à réaliser. De ce fait, l'utilisation n de solution ns approchées est envisageable.

I.4.2- Filtre de Kalman Etendu (EKF) [3] [8]

Le filtre de Kalman étendu est l'une des techniques d'estimation les plus populaires et largement étudiées dans le domaine d'estimation d'état des systèmes dynamiques non linéaires. Ce filtre étendu consiste à utiliser les équations du filtre de Kalman standard au modèle non linéaire linéarisé par la formule de Taylor au premier ordre.

Ce filtre étendu a été appliqué avec succès sur différents types de procédés non linéaires.

Malheureusement, les preuves de stabilité et de convergence établies dans le cas des systèmes linéaires, ne peuvent être étendues de manière générale au cas des systèmes non linéaires.

I.4.3- Observateurs à grand gain

Les techniques dites à grand gain peuvent être appliquées sans transformation du système initial. Dans ce cas, la conception de l'observateur se fait directement à partir de la structure du système. Cette technique utilise la théorie de stabilité de Lyapunov pour adapter les techniques développées dans le cas linéaire. Des méthodes sont développées donnent des conditions suffisantes de convergence de l'état estimé vers l'état réel du système, pour la classe des systèmes non linéaires décrits par le modèle suivant [8] [3] :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + f(u(t), x(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (\text{I.27})$$

La dynamique de l'état comporte une partie linéaire non commandée et une partie non linéaire commandée, vérifiant en général la condition de Lipschitz par rapport à x .

$$\|f(x_1) - f(x_2)\| \leq k\|x_1 - x_2\| \quad (\text{I.28})$$

L'observateur à grand gain possède la structure suivante :

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + f(\hat{x}(t), u(t)) - K(y(t) - C\hat{x}(t)) \quad (\text{I.29})$$

L'appellation grand gain provient de la structure de l'observateur : lorsque la fonction non linéaire possède une grande constante de Lipschitz, la moindre erreur entre l'état réel et l'état estimé va se répercuter et croître. Par conséquent, le gain K de l'observateur (I.29) doit être important pour compenser cette amplification de l'erreur.

La dynamique de l'erreur d'estimation $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ se déduit de (I.27) et (I.29) :

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) + f(x(t), u(t)) - f(\hat{x}(t), u(t)) \quad (\text{I.30})$$

Il a été démontré dans, que si le gain K est choisi telle que :

$$k < \frac{\lambda_{\min}(Q)}{\lambda_{\max}(P)} \quad (\text{I.31})$$

Où k est la constante de Lipchitz de $f(x(t), u(t))$, $\lambda_{\min}(Q)$ et $\lambda_{\max}(Q)$ sont les valeurs propres maximales et minimales. Q est une matrice symétrique définie positive et P est une matrice définie positive, solution de l'équation de Lyapunov :

$$(A - KC)^T P + (A - KC) = -Q \quad (\text{I.32})$$

La synthèse de l'observateur consiste à ajuster les matrices P , Q et K de façon à garantir l'égalité (I.32). Ensuite, on vérifie si la condition (I.31) est satisfaite. Ainsi, et malgré l'intérêt du résultat, cette méthode n'est pas constructive, elle ne donne aucune indication sur le choix d'un gain satisfaisant la condition (I.31). Cette approche a été étendue par plusieurs auteurs.

Pour simplifier le problème on peut remplacer la matrice Q par une matrice identité ; et cela revient à choisir un gain K qui satisfait :

$$k < \frac{1}{\lambda_{\max}(P)} \quad (\text{I.33})$$

Ces techniques dites à grand gain sont très répandues dans la littérature. Il s'agit principalement de techniques de vérification, qui permettent d'établir des conditions suffisantes de convergence de l'état estimé vers l'état réel. La structure de l'observateur non linéaire est une structure de Luenberger étendue au cas non linéaire [3].

I.5 - Observateurs à mode glissant

Dans toutes les méthodes vues précédemment, le modèle dynamique du système étudié était supposé parfaitement connu. Ici, il s'agit de développer une certaine robustesse vis-à-vis d'incertitudes paramétriques. Le principe des observateurs à modes glissants consiste à contraindre, à l'aide de fonctions discontinues, les dynamiques d'un système d'ordre n à converger vers une variété S de dimension $(n - p)$ dite surface de glissement (p étant la dimension du vecteur de mesure) [8] [7]. L'attractivité de cette surface est assurée par des conditions appelées conditions de glissement. Si ces conditions sont vérifiées, le système converge vers la surface de glissement et y évolue selon une dynamique d'ordre $(n - p)$.

Dans le cas des observateurs à modes glissants, les dynamiques concernées sont celles des erreurs d'observation $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$. A partir de leur valeur initiale $e(0)$, ces erreurs convergent vers les valeurs d'équilibre en deux étapes :

Dans une première phase, la trajectoire des erreurs d'observation évolue vers la surface de glissement sur laquelle les erreurs entre la sortie de l'observateur et la sortie du système réel (les mesures) $e_y(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ sont nulles. Cette étape, qui généralement est très dynamique, est appelée mode d'atteinte.

Dans la seconde phase, la trajectoire des erreurs d'observation glisse sur la surface de glissement avec des dynamiques imposées de manière à annuler toutes les erreurs d'observation. Ce dernier mode est appelé mode de glissement. Les différentes étapes de synthèse d'un observateur à mode glissant sont connues et clairement identifiées dans [8]. Ces dernières sont rappelées ci-dessous. Considérons un système d'état non linéaire d'ordre n :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u), & x \in R^n \\ y = h(x) & y \in R^p \end{cases} \quad (I.34)$$

L'observateur en mode glissant est défini avec la structure suivante :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) - K\Gamma_s \\ \hat{y} = h(\hat{x}) \end{cases} \quad (I.35)$$

Où :

K : est la matrice de gain de dimension $(n \times p)$.

Γ_s : est un vecteur de dimension $(p \times 1)$ défini tel que :

$$\Gamma_s = [\text{sign}(\hat{y}_1 - y_1) \cdots \text{sign}(\hat{y}_p - y_p)]^T$$

Nous définissons également les vecteurs relatifs aux erreurs d'observation tel que :

$e = \hat{x} - x$: est le vecteur d'état des erreurs d'observation.

$s = e_y = C(\hat{x} - x)$: est la surface de glissement.

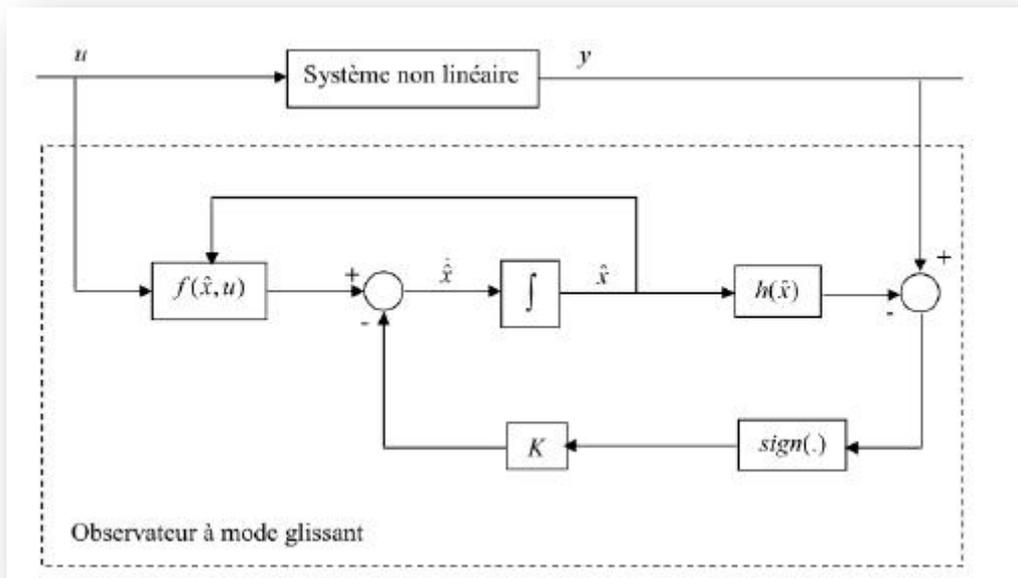


Figure I.4 : Schéma fonctionnel d'un observateur à mode glissant.

Pour que l'état estimé converge vers l'état réel, l'observateur à mode glissant doit respecter deux conditions.

1. La première concerne le mode d'atteinte et garantit l'attractivité de la surface de glissement $S = 0$ de dimension P , laquelle est attractive si la fonction de Lyapunov $V(x) = S^T S$, vérifie la condition $\dot{V}(x) < 0$ si $S \neq 0$.
2. La deuxième concerne le mode glissant, durant cette étape, la matrice des gains correctifs agit de manière à satisfaire la condition d'invariance suivante :

$$\begin{cases} \dot{S} = 0 \\ S = 0 \end{cases}$$

I.5.1- Observateurs à mode glissant des systèmes linéaires

Considérons à nouveau le système (II.3), où la paire (A, C) est supposée observable. La reconstruction des variables d'état est basée sur les sorties mesurées, un changement de coordonnées peut être effectué pour que les sorties apparaissent directement comme des composantes du vecteur d'état. Sans perte de généralité la matrice de sortie peut être réécrite comme suit [8]:

$$C = [C_1 \quad C_2]$$

Où $C_1 \in R^{p \times (n-p)}$, $C_2 \in R^{p \times p}$ et le déterminant de C_2 est non nul. En respectant ces conditions, une matrice de transformation non singulière T permet de réécrire respectivement les matrices de sortie, d'état et de commande dans les nouvelles coordonnées comme suit :

$$\begin{aligned} \tilde{C} &= CT^{-1} = [0 \quad I_p], \\ \tilde{A} &= TAT^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \\ \tilde{B} &= BT = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

Où :

$$T = \begin{bmatrix} I_{p-n} & 0 \\ C_1 & C_2 \end{bmatrix},$$

Le système (II.1) peut donc être mis sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = A_{11}x_1(t) + A_{12}y(t) + B_1u(t) \\ \dot{y}(t) = A_{21}x_1(t) + A_{22}y(t) + B_2u(t) \end{cases} \quad (\text{I.36})$$

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = Tx(t) \quad \text{et } x_1(t) \in R^{n-p}$$

L'observateur à mode glissant proposé pour ce type de système est :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1(t) = A_{11}\hat{x}_1(t) + A_{12}\hat{y}(t) + B_1u(t) + Lv(t) \\ \dot{\hat{y}}(t) = A_{21}\hat{x}_1(t) + A_{22}\hat{y}(t) + B_2u(t) - v(t) \end{cases} \quad (\text{I.37})$$

Ou $\hat{y}(t)$ et $\hat{x}_1(t)$ sont les estimées de $y(t)$ et $x_1(t)$ $L \in R^{(n-p) \times p}$ est le gain de l'observateur et la fonction discontinue $v(t)$ est donnée par :

$$v(t) = K \text{sign}(\hat{y}_i(t) - y_i(t)), \quad \text{avec } K > 0.$$

$\hat{y}_i(t)$ et $y_i(t)$ sont respectivement les composantes des vecteurs $\hat{y}(t)$ et $y(t)$. Les erreurs d'estimation d'état et de sortie sont données par :

$$\begin{aligned} e_1(t) &= \hat{x}_1(t) - x_1(t) \\ e_y(t) &= \hat{y}(t) - y(t) \end{aligned} \quad (\text{I.38})$$

A partir des équations (I.24), (I.25) et (I.26) ; la dynamique des erreurs d'estimation s'écrit

$$\begin{cases} \dot{e}_1(t) = A_{11}e_1(t) + A_{12}e_y(t) + Lv(t) \\ \dot{e}_y(t) = A_{21}e_1(t) + A_{22}e_y(t) - v(t) \end{cases} \quad (\text{I.39})$$

La paire (A_{11}, A_{21}) est observable car la paire (A, C) est observable. Par conséquent, le gain L peut être choisi tel que les valeurs propres de la matrice $A_{11} + LA_{21}$ soit dans le demi-plan gauches du plan complexe [3].

Définissons maintenant un nouveau changement de variables tel que :

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = T_L \begin{bmatrix} x_1(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{n-p} & L \\ 0 & I_p \end{bmatrix}$$

Avec ce changement de variables, la dynamique des erreurs d'estimation s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{\tilde{e}}_1(t) = \tilde{A}_{11}e_1(t) + \tilde{A}_{12}e_y(t) \\ \dot{e}_y(t) = \tilde{A}_{21}e_1(t) + \tilde{A}_{22}e_y(t) - v(t) \end{cases} \quad (\text{I.40})$$

Où :

$$\begin{aligned} \tilde{e}_1(t) &= e_1(t) + Le_y(t) \\ \tilde{A}_{11} &= A_{11} + LA_{21} \\ \tilde{A}_{12} &= A_{12} + LA_{22} - \tilde{A}_{11}L \\ \tilde{A}_{21} &= A_{22} - A_{21}L \end{aligned}$$

Utkin [9] a montré en utilisant la théorie des perturbations singulières que pour un gain Kassez grand, un régime glissant peut être établi sur l'erreur de sortie (I.40). Donc après un temps fini, l'erreur $e_y(t)$ et sa dérivée seront nulles et on aura à partir l'équation (I.40) :

$$\tilde{e}_1(t) = \tilde{A}_{11}\hat{e}_1(t) \quad (\text{I.41})$$

Avec un choix correct du gain (un gain qui stabilise A_{11}) le système d'équation(I.41) est stable et $\tilde{e}_1(t) \rightarrow 0$ quant $t \rightarrow \infty$, ce qui veut dire que :

$\tilde{x}_1(t) \rightarrow x_1(t)$ et $x_2(t)$ peut être reconstruite dans le système de coordonnées original par :

$$\hat{x}_1(t) = C_2^{-1}(y(t) + C_1\hat{x}_1(t))$$

En pratique la difficulté majeure de cette approche réside dans le choix d'un gain approprié K pour établir un régime glissant dans un temps fini.

I.5.2 -Observateurs à mode glissant sous forme triangulaire

L'observateur en mode glissant sous forme triangulaire a été développé pour des systèmes pouvant se mettre sous la forme, appelée forme triangulaire d'observation, suivante [7] [8] [10] :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + g_1(x_1, u) \\ \dot{x}_2 = x_3 + g_2(x_1, x_2, u) \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} = x_n + g_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, u) \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) + g_n(x_1, x_2, \dots, x_n, u) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (\text{I.42})$$

Où f_n et g_i , pour $i = 1, \dots, n$, sont des fonctions scalaires, x_i sont les états du système, u est le vecteur d'entrée et y est la sortie. La structure de l'observateur proposé est :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + g_1(x_1, u) - \lambda_1 \text{sign}_1(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_3 + g_2(x_1, \bar{x}_2, u) - \lambda_2 \text{sign}_2(\bar{x}_2 - \hat{x}_2) \\ \vdots \\ \dot{\hat{x}}_{n-1} = \hat{x}_n + g_{n-1}(x_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{n-1}, u) - \lambda_{n-1} \text{sign}_{n-1}(\bar{x}_n - \hat{x}_{n-1}) \\ \dot{\hat{x}}_n = f_n(x_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) + g_n(x_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n, u) - \lambda_n \text{sign}_n(\bar{x}_n - \hat{x}_n) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (\text{I.43})$$

Où les variables \bar{x}_1 sont données par :

$$\begin{cases} \bar{x}_1 = x_1 \\ \bar{x}_i = \hat{x}_i + \lambda_{i-1} \text{sign}_{\text{eq}, i-1}(\bar{x}_{i-1} - \hat{x}_{i-1}) \text{ pour } i > 1 \end{cases} \quad (\text{I.44})$$

Avec sign_{eq} désigne la fonction $\text{sign}(\cdot)$ classique filtrée par un filtre passe bas ; la fonction sign_i est définie de manière à imposer que le terme correctif ne soit actif que si $\bar{x}_j - \hat{x}_j = 0$ pour $j = 1, \dots, i$ c'est-à-dire, s'il existe $j \in \{1, \dots, i-1\}$ tel que $\bar{x}_j - \hat{x}_j \neq 0$ alors la fonction est mise à zéro sinon elle est égale à la fonction sign_i usuelle.

✓ La convergence des erreurs d'observation se fait par étapes [8] :

Etape 1 : Dans cette étape on assure la convergence de $e_1 = x_1 - \hat{x}_1$ vers zéro dans un temps $t_1 > t$. Pour $i > 1$ toutes les fonctions $sign_i$ sont égales à zéro, les dynamiques des erreurs d'observation $e = x - \hat{x}$ sont donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{e}_1 = e_2 - \lambda_1 sign_1(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{e}_2 = e_3 + g_2(x_1, x_2, u) - g_2(x_1, \hat{x}_2, u) \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{e}_{n-1} = e_n + g_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, u) - g_{n-1}(x_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_{n-1}, u) \\ \dot{e}_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) - f_n(x_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) + g_n(x_1, x_2, \dots, x_n, u) - \\ \quad g_n(x_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n, u) \end{array} \right. \quad (\text{I.45})$$

On considère la fonction de Lyapunov $V_1 = \frac{e_1^2}{2}$ alors :

$$\dot{V}_1 = e_1(e_2 - \lambda_1 sign(e_1))$$

En choisissant $\lambda_1 > |e_2|_{max}$, l'erreur d'observation e_1 converge vers zéro en un temps fini t_1 .

Après cet instant, e_1 reste égale à zéro et on obtient alors $e_2 = \lambda_1 sign(x_1 - \hat{x}_1)$ ce qui implique que $e_2 = 0$ alors $x_2 = \hat{x}_2 \Rightarrow \bar{x}_2 = x_2$.

Etape 2 : L'objectif dans cette étape est d'atteindre la surface de glissement

$e_2 = x_2 - \hat{x}_2 = 0$. Pour rester sur la surface $e_1 = 0$, il faut que $\lambda_1 > |e_2|_{max}$, mais cela est vérifié de part le fait que e_2 est strictement décroissante après t_1 . Les dynamiques des erreurs d'observation sont alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{e}_1 = e_2 - \lambda_1 sign_1(x_1 - \hat{x}_1) = 0 \\ \dot{e}_2 = e_3 + g_2(x_1, x_2, u) - g_2(x_1, \hat{x}_2, u) - \lambda_2 sign(x_1 - \hat{x}_1) = e_3 - \lambda_2 sign(e_2) \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{e}_{n-1} = e_n + g_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, u) - g_{n-1}(x_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_{n-1}, u) \\ \dot{e}_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) - f_n(x_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) + g_n(x_1, x_2, \dots, x_n, u) - \\ \quad - g_n(x_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n, u) \end{array} \right. \quad (\text{II.46})$$

En choisissant la fonction de Lyapunov $V_2 = \frac{e_1^2}{2} + \frac{e_2^2}{2}$ on aura :

$$\dot{V}_2 = e_1(e_2 - \lambda_1 sign(e_1)) + e_2(e_3 - \lambda_2 sign(e_2))$$

$$\dot{V}_2 = e_2(e_3 - \lambda_1 \text{sign}(e_2))$$

Si $\lambda_2 > |e_3|_{\max}$ alors e_2 converge vers zéro après un temps fini $t_2 > t_1$. L'erreur d'observation est strictement décroissante durant la période $[t_1 \ t_2]$ ce qui implique que après un temps fini t_2 , $\bar{x}_3 = x_3$.

Ainsi, étape par étape nous obtenons la convergence de toutes les composantes de l'erreur d'observation vers zéro et celles de \hat{x} vers x pour tous $i < n$, sous conditions, que $\lambda_i > |e_{i+1}|_{\max}$.

Etape n : Cette étape commence à l'instant t_{n-1} , à cet instant $e_k = 0$ pour tous $k < n$.

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - \lambda_1 \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) = 0 \\ \dot{e}_2 = e_3 - \lambda_2 \text{sign}(x_2 - \hat{x}_2) = 0 \\ \vdots \\ \dot{e}_{n-1} = e_n - \lambda_{n-1} \text{sign}(x_n - \hat{x}_n) = 0 \\ \dot{e}_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) - f_n(x_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) + g_n(x_1, x_2, \dots, x_n, u) \\ \quad - g_n(x_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n, u) - \lambda_n \text{sign}(\bar{x}_n - \hat{x}_n) = -\lambda_n \text{sign}_n(e_n) \end{cases} \quad (\text{I.47})$$

De la même façon, on choisit la fonction de Lyapunov $V_n = \frac{e_1^2}{2} + \frac{e_2^2}{2} + \dots + \frac{e_n^2}{2}$

On obtient donc

$$\dot{V}_n = e_n(-\lambda_n \text{sign}(e_n))$$

Ainsi, e_n converge vers zéro en un temps fini $t_n > t_{n-1}$ pour toutes valeurs de $\lambda_n > 0$,

Alors la dynamique de l'erreur d'observation devient :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = 0 \\ \dot{e}_2 = 0 \\ \vdots \\ \dot{e}_{n-1} = 0 \\ \dot{e}_n = -\lambda_n \text{sign}_n(e_n) \end{cases}$$

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un état d'art sur les observateurs linéaires et non linéaires en donnant la méthodologie de synthèse de quelques un entre eux.

Nous avons proposés un observateur mode glissant qui présent l'avantage d'être robuste aux incertitudes sur les paramètres du modèle.

L'observateur mode glissant sous formes triangulaire a été développé pour des systèmes pouvant se mettre sous la forme appelée forme triangulaire, il sera appliqué comme un bloc de détection de panne pour un bras manipulateur à un degré de liberté.

Chapitre II :
Diagnostic des défauts
pour les robots
manipulateurs

II.1- Introduction

Pour atteindre les objectifs d'automatisation des processus technologiques, on fait appel à des méthodes qui deviennent de plus en plus sophistiquées. La finalité de cette complexité croissante est l'augmentation de la performance, de la fiabilité, de la disponibilité et de la sûreté de fonctionnement de ces processus. Le besoin de sûreté de fonctionnement et de fiabilité est encore plus crucial lorsqu'il s'agit de systèmes sensibles pour lesquels une fausse manœuvre peut être coûteuse aussi bien humainement que financièrement. Ceci est le cas, par exemple, des usines de produits chimiques, des réacteurs nucléaires, des systèmes de transport à grande vitesse, des systèmes aéronautiques et bien d'autres encore. En vue de remplir ces objectifs de performance, de sécurité et de disponibilité des processus technologiques, on leur associe des modules de diagnostic servant à détecter tout écart de comportement par rapport au comportement souhaité et même dans certaines situations à reconfigurer le fonctionnement du système.

II.2 -Définitions et généralités

Les définitions suivantes ont été extraites à partir des références suivantes :

[13] [14] [15]

II.2.1- Termes généraux

- ***Faute***

Action, volontaire ou non, dont le résultat est la non prise en compte correcte d'une directive, d'une contrainte exprimée par le cahier des charges.

- ***Défaut***

Ecart existant entre la valeur réelle d'une caractéristique du système et sa valeur nominale.

- ***Dégradation***

Une dégradation représente une perte de performances d'une des fonctions assurées par un équipement.

Si les performances sont au-dessous du seuil d'arrêt défini dans les spécifications fonctionnelles de cet équipement, il n'y a plus dégradation mais défaillance.

- **Défaillance**

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques.

On peut classer les défaillances selon leur degré de sévérité par :

-**Défaillance critique**: nécessite une intervention d'urgence.

-**Défaillance significative**: nécessite un processus de traitement.

-**Défaillance absorbable** : pouvant être ignorée dans un premier temps.

- **Erreur**

Partie du système ne correspondant pas ou correspondant incomplètement au cahier des charges. En toute logique, une erreur est la conséquence d'une faute.

- **Panne**

Une panne est l'inaptitude d'une entité (composant ou système) à assurer une fonction requise. Si nous écartons la possibilité d'erreurs de conception, la définition précédente implique que toute défaillance entraîne une panne. La défaillance correspond à un événement et la panne à un état. Sur le plan temporel, la défaillance correspond à une date et la panne à une durée comprise entre la date d'occurrence de la défaillance et la date de fin de réparation.

- **Résidu**

Signal conçu comme indicateur d'anomalies fonctionnelles ou comportementales.

- **Mode de fonctionnement**

Un système présente généralement plusieurs modes de fonctionnement. On peut observer des modes de plusieurs types parmi lesquels :

-**Mode de fonctionnement nominal** : c'est le mode où l'équipement ou le système industriel remplit sa mission dans les conditions de fonctionnement requises par le constructeur et avec les exigences attendues de l'exploitant.

-**Mode de fonctionnement dégradé** : qui correspond soit à l'accomplissement partiel de la mission, soit à l'accomplissement de celle-ci avec des performances moindres.

Il y a eu dégradation dans l'équipement ou le système mais pas de défaillance.

-Mode de défaillance : qui correspond à des mauvais fonctionnements du système, c'est-à-dire qu'il y a eu défaillance soit après dégradation soit défaillance brusque. Un mode de défaillance est caractérisé par les effets causés par cette défaillance. Ces effets peuvent être mesurables ou qualifiables. En faisant une analyse de cause à effet de la défaillance, on peut associer le mode de défaillance à toute cette analyse faite par un expert. En d'autres termes, à chaque mode de défaillance, on associe une décision et une interprétation possible. Chaque équipement ou système peut posséder qu'un seul mode nominal ; par contre, il possède plusieurs modes de défaillance.

II.2.2 -Fonctions

- **Acquisition**

Collecte des données en provenance du procédé.

- **Détection**

Pour détecter les défaillances du système, il faut être capable de classer les situations observables comme étant normales ou anormales.

- **Suivi**

Fonction maintenant en permanence un historique des traitements effectués par le système de commande/supervision et une trace des événements que perçoit le système.

- **Diagnostic**

L'objectif de la fonction diagnostic est de rechercher les causes et de localiser les organes qui ont entraîné une observation particulière

.

- **Localisation**

La localisation permet de déterminer le sous-ensemble fonctionnel défaillant.

- **Identification de la cause**

Cette dernière étape consiste à déterminer les causes qui ont mené à une situation anormale.

- **Reconfiguration**

Fonction consistant à changer la commande envoyée au système ou la disposition matérielle du système pour éviter (ou faire face à) une panne.

II.3- Procédure de la détection et d'isolation des défauts

La procédure de détection et d'isolation des défauts passe par trois étapes essentielles : La détection, la localisation et l'identification. Ces étapes sont résumées sur la figure suivante [11] :

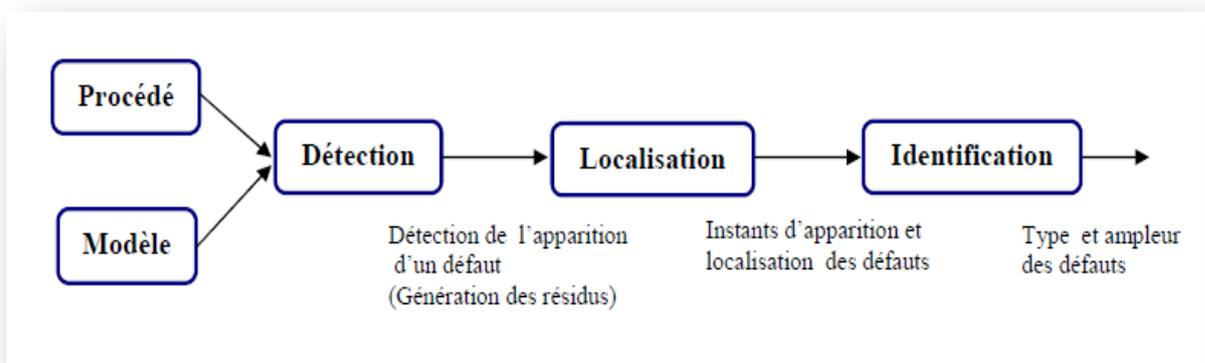


Figure II.1 : Procédure de détection et d'isolation des défauts

II.4- Méthodes de diagnostic

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses et variées, elles correspondent à la diversité des problèmes rencontrés. Il est possible de les classer selon le schéma de la figure (II.2), [11].

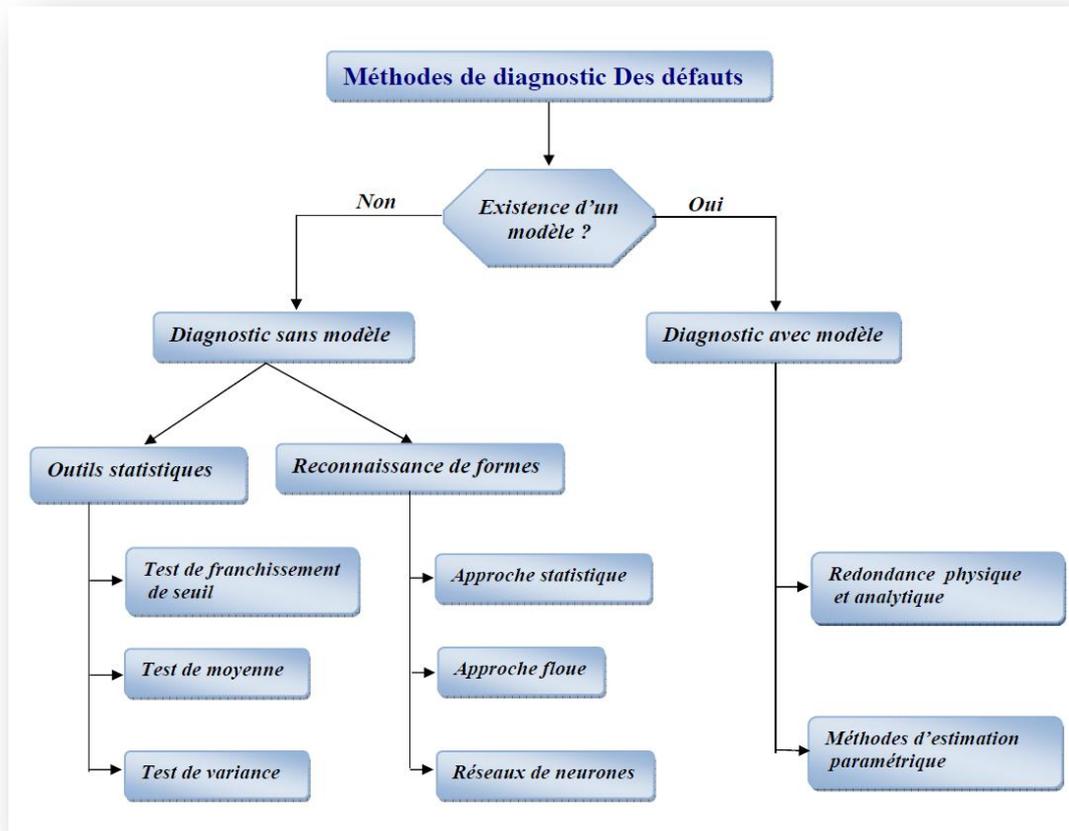


Figure II.2 : Classifications des méthodologies de diagnostic industriel.

Les méthodes de diagnostic industriel tel qu'elles sont présentées dans ce paragraphe sont illustrées sur la Figure (I.4). L'existence d'un modèle formel ou mathématique de l'équipement détermine la méthode de diagnostic utilisée. Le diagnostic avec modèle se compose essentiellement de deux techniques : méthodes de redondance physique et analytique et méthodes d'estimation paramétrique. D'un autre côté, les méthodes qui ne se basent pas sur l'existence du modèle se divisent en deux catégories : méthodes utilisant des outils statistiques et méthodes de reconnaissance des formes.

Les outils statistiques établissent des tests sur les signaux d'acquisition. Ces tests ne sont capables d'assurer que la fonction détection de défaillances. Par contre, les techniques de diagnostic par reconnaissance des formes sont plus élaborées par rapport aux simples tests statistiques et sont capables de détecter et de diagnostiquer les défaillances.

Les méthodes les plus familières aux automaticiens sont les méthodes basées sur l'utilisation de modèles mathématiques. Celles-ci utilisent la redondance existant entre les différentes variables mesurées en terme de relations statiques ou dynamiques.

II.5 -Diagnostic des défauts pour les robots manipulateurs

La détection et la localisation des défauts en robotique constituent un problème d'une grande importance. En effet, les robots ont intégré de nombreux domaines, y compris le domaine industriel, où ils effectuent des tâches répétitives ou dangereuses avec rigueur, par exemple dans l'industrie nucléaire ou dans des environnements créant une forte corrosion (figure II.3). Ainsi, l'apparition d'un défaut peut engendrer des dégâts irréparables si ce dernier n'est pas détecté le plus rapidement et le plus efficacement possible.



Figure II.3 : Bras manipulateur robotisé dans une chaîne de production

Les facteurs engendrant ces anomalies peuvent provenir de l'environnement externe au robot, qui change d'une manière permanente (température, humidité...etc.) ou encore de son environnement interne, qui subit des changements importants et indésirables dus par exemple aux frottements, aux bruits et aux vibrations (figure II.4) [11].

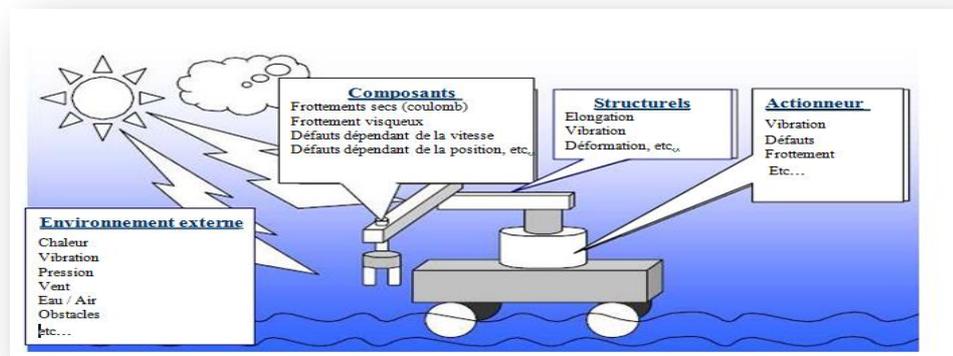


Figure II.4

Ce pendant, dans beaucoup de situations pratiques, pour des raisons techniques ou économiques (construction, positionnement et/ou coût des capteurs), il n'est pas possible d'accéder à toutes les variables d'état d'un système. La mise en place d'un observateur permet de répondre à ce problème.

Les performances d'un outil de diagnostic sont conditionnées par la précision du modèle utilisé, la robustesse de l'observateur aux bruits de mesures ou de modèles afin de limiterai maximum les fausses alarmes tout en garantissant un bon niveau de détection des pannes.

II.6 -Type de défauts

Si l'on considère un procédé de régulation, il est possible de classer les défauts en trois catégories :

- **Défaut actionneur** : agit au niveau de la partie opérative et détériore ainsi le signal d'entrée du système, par exemple une perte de puissance d'un moteur ou une fuite dans un vérin.
- **Défaut système ou composant** : s'identifie par la modification des caractéristiques du système proprement dit. Le vieillissement des matériaux en est un exemple.
- **Défaut capteur** : c'est la cause d'une mauvaise image de l'état physique du système, par exemple un mauvais étalonnage ou un vieillissement de l'organe récepteur d'un capteur.

La figure (II.5) illustre ces différents types de défauts :

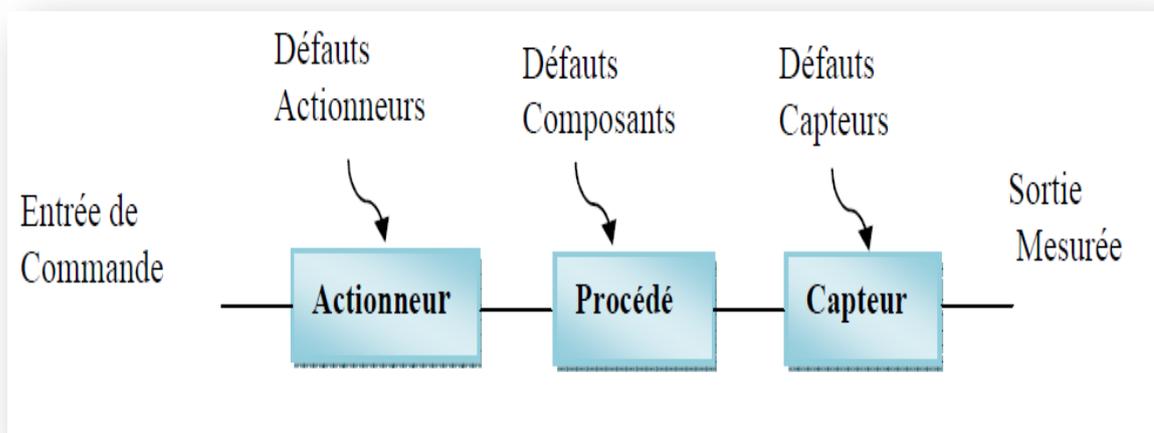


Figure II.5 : Types de défauts

II.7-Modélisation des défauts

Supposons que l'on dispose d'un modèle linéaire d'un procédé sous la forme d'une représentation d'état, telle que :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Où $x(t)$ représente le vecteur d'état, $u(t)$ le vecteur de commande et $y(t)$ le vecteur de sortie du système, tels que : $x \in R^n, u \in R^m$ et $y \in R^p$. A, B, C et D sont des matrices de dimensions respectives $n \times n, n \times m, p \times m$. Alors :

- Les défauts actionneurs sont modélisés comme des signaux additifs aux signaux d'entrée.
- Les défauts composants sont modélisés comme une dynamique additionnelle avec une matrice de distribution.
- Les défauts capteurs sont modélisés par des signaux additifs aux signaux de sortie.

Si l'on suppose que les trois types de défauts agissent sur le système, la modélisation mettant en évidence ces derniers peut être donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Hf_p(t) + B(u(t) + f_a(t)) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + f_c(t) \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Où $f_a(t), f_p(t)$ et $f_c(t)$ représentent respectivement les défauts d'actionneurs, les défauts composants et les défauts des capteurs, tels que : $n \times n, n \times m$ et $p \times m$.

La matrice H est dite matrice de distribution de $f_p(t)$.

II.8- Modélisation des perturbations

En plus des défauts, le système peut être soumis à d'autres signaux dits entrées inconnues (perturbations et bruits), ainsi qu'à des incertitudes de modélisation. Si l'influence de ces signaux sur le système est connue, alors il est possible de réécrire les équations précédentes sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Hf_p(t) + B(u(t) + f_a(t) + Ed_a(t)) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + f_c(t) + d_c(t) \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Où $d_a(t) \in R^{d \times 1}$ et $d_c \in R^{p \times 1}$ représentent respectivement les perturbations et les bruits agissant sur le système. La matrice E est dite matrice de distribution de $d_a(t)$.

L'origine des perturbations est souvent due à une modélisation imparfaite du système, engendrant une action non connue sur ce dernier. Les perturbations font l'objet de caractéristiques particulières.

II.9-Défauts des robots manipulateurs

Différentes classifications de défauts peuvent être proposées pour les robots manipulateurs, selon le contexte, les objectifs, le milieu dans lequel fonctionne le robot et bien d'autres critères. Une première classification des défauts peut être formulée sous la forme suivante :

- ❖ Défauts au niveau des capteurs de position ou de vitesse.
- ❖ Défauts dans la structure mécanique, par exemple une articulation bloquée.
- ❖ Défauts d'actionneurs qui peuvent apparaître soit au niveau de la commande, soit au niveau du moteur.

Une autre classification, peut être donnée dans le cas où l'on s'intéresse au problème de reconfiguration. Il s'agit de distinguer entre les défauts catastrophiques et les défauts non catastrophiques. Le premier type engendre un dysfonctionnement du système qu'il est impossible de corriger ou de contrer son effet. Un exemple de défauts catastrophiques est un court circuit au niveau du moteur. Le seul moyen de corriger ce type d'anomalies est l'intervention de l'opérateur humain par le remplacement du composant défectueux. Le second type de défauts est généralement pris en compte lors de l'étude du problème d'accommodation. Ils peuvent être corrigés en modifiant la loi de commande lors de leur apparition. Parmi ces défauts, ceux dus aux frottements, aux variations de l'environnement externe ou encore des défauts au niveau des actionneurs...etc. Les défauts non catastrophiques peuvent engendrer des dégâts importants tels que des pertes en productivité, une diminution de la durée de vie du système, mais aussi, ils favorisent un environnement dangereux pour l'opérateur humain.

L'étude qui suit concerne le diagnostic des défauts pour les robots manipulateurs. L'intérêt portera, particulièrement, sur le robot un degré de liberté.

II.10-Modélisation du robot manipulateur en vue de son diagnostic

II.10.1-Modèle du robot sain

L'étude en cours concerne le robot manipulateur à un degré de liberté, dont le modèle dynamique est donné par :

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + \eta(\theta, \dot{\theta}, \tau, t) = \tau \quad (\text{II.4})$$

Où : $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta} \in R^n$ dénote respectivement la vectrice position articulaire, vecteur vitesse articulaire et vecteur accélération articulaire. $\tau \in R^n$ C'est le vecteur des couples/forces d'entrée. $V(\theta, \dot{\theta}) \in R^n$ représente les forces centrifuges et Coriolis. $G(\theta) \in R^n$ est le vecteur gravitationnel. $M(\theta) \in R^{n \times n}$ la matrice d'inertie. $\eta(\theta, \dot{\theta}, \tau, t) \in R^n$ en globe toutes les dynamiques négligées et les incertitudes de modélisation supposées bornées.

Les expressions de $M(\theta), V(\theta)$ et $G(\theta)$ peuvent être retrouvées en annexe ainsi que les hypothèses de fonctionnement du robot.

En pratique, il est très difficile, voire même impossible, d'aboutir à un modèle exact, reflétant parfaitement la dynamique du système réel. C'est pour cette raison, qu'il est nécessaire de considérer les incertitudes et les dynamiques négligées, en particulier lors de l'étude des problèmes de reconfiguration et de correction de lois de commande.

II.10.2-Modélisation des défauts

Les défauts considérés dans ce qui suit sont des défauts non catastrophiques, dépendant des états et des entrées du système. Ces derniers peuvent être représentés par le modèle dynamique générale :

$$F(\theta, \dot{\theta}, \tau, t) = \beta(t - T)f(\theta, \dot{\theta}, \tau) \quad (\text{II.5})$$

Où $f(\theta, \dot{\theta}, \tau) \in R^n$ représente la dynamique du défaut.

$\beta(t - T)$ Traduit l'apparition ou pas du défaut considéré.

T c'est l'instant où le défaut se produit.

$$\beta(t - T) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < T \\ 1 & \text{si } t \geq T \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

II.10.3-Défauts composants et défauts actionneurs

Il est important de pouvoir différencier entre les défauts qui dépendent de l'état (défauts composants) et ceux qui dépendent du couple d'entrée (défauts actionneurs) :

$$f_m(\theta, \dot{\theta}, t) = f_{m_\theta}(\theta, \dot{\theta}) + f_{m_\tau}(\tau) \quad (\text{II.7})$$

Où $f_{m_\theta}(\theta, \dot{\theta}, t)$ et $f_{m_\tau}(\tau)$ représentent respectivement les défauts composants et actionneurs.

Ainsi, le modèle du robot, tenant compte des défauts précédents, se met sous la forme :

$$\underbrace{M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + \eta(\theta, \dot{\theta}, \tau, t)}_{\uparrow} + \underbrace{\beta(t - T) [f_{m_\theta}(\theta, \dot{\theta}) + f_{m_\tau}(\tau)]}_{\uparrow} = \underbrace{\tau}_{\uparrow} \quad (\text{II.8})$$

Le modèle dynamique de robot La dynamique de fautes couples/forces d'entrée

Des exemples de modèles de défauts composants sont représentés sur le tableau (Thèse de Vitaly M. Kmelnitsky, Juillet 2002).

Défaut	Modèle
Frottements secs (coulomb)	$f(\dot{\theta}) = \alpha \text{sign}(\dot{\theta})$
Frottement visqueux	$f(\dot{\theta}) = \alpha \dot{\theta}$
Défauts dépendant de la position	$f(\theta) = k_f \sin(\omega_0 \theta + \varphi)$
Défauts dépendant de la vitesse	$f(\theta) = [\alpha_0 + \alpha_1 e^{-\beta \dot{\theta} } \alpha_1] \text{sign}(\dot{\theta})$

Tableau II.1 : Exemples de modèles de défauts composants.

Généralement, les actionneurs sont des moteurs électriques. Les défauts les plus courants, dans ce cas, sont les défauts électriques, les vibrations, les frottements...etc.

Nous avons considéré, dans les simulations effectuées par la suite, des défauts électriques, engendrant un affaiblissement du couple, dont le modèle mathématique peut être donné par (Thèse de Vitaly M.Kmelnitsky, Juillet 2002):

Défauts électriques	$f(\tau) = \alpha\tau \quad 0 \leq \tau \leq 1$
---------------------	---

II.11 -Commande PID du robot

La commande des robots manipulateurs constitue à l'heure actuelle l'une des préoccupations majeures des recherches en robotique. En effet la majorité des tâches confiées aux robots sont délicates et exigent une très grande précision sous des trajectoires rapides. Durant ces trois dernières décennies, afin d'améliorer les performances des manipulateurs, des recherches avancées ont permis de faire émerger de nouvelles techniques de commande appliquées aux robots manipulateurs.

Dans cette étude, la commande du robot manipulateur un degré de liberté, s'effectue à l'aide d'une loi de commande (figure II.6) de type PID (proportionnel intégral dérivé).

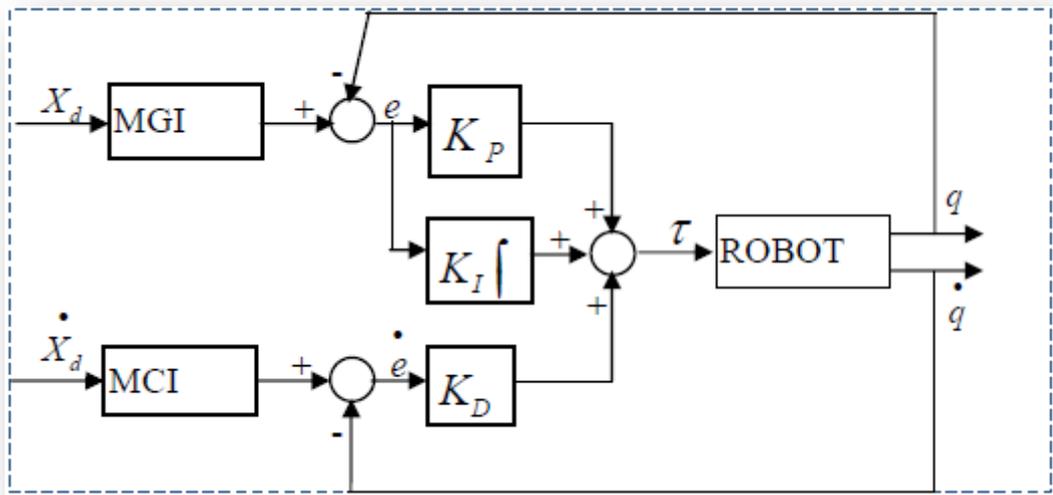


Figure II.6 : Commande PID.

Donc l'équation du couple s'écrit :

$$\tau = K_p(\theta_d - \theta) + K_D(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_I \int (\theta_d - \theta) dt \quad (\text{II.9})$$

Où K_p , K_D et K_I sont des matrices constantes, diagonales et positives de dimension $n \times n$, n représente le degré de liberté (nombre d'articulations).

θ_d et $\dot{\theta}_d$ Représentent respectivement les vecteurs de position et vitesse articulaires désirée.

θ et $\dot{\theta}$ Représentent respectivement les vecteurs de position et vitesse articulaires actuelles (ou mesurées).

On notera :

Vecteur de l'erreur de position : $e(t) = \theta_d - \theta$

Vecteur de l'erreur de vitesse : $\dot{e}(t) = \dot{\theta}_d - \dot{\theta}$

Des simulations ont été effectuées sur MATLAB/ SIMULINK afin de tester les performances de la commande PID.

II.12-Exemple d'un bras manipulateur à un degré de liberté [12]

On peut simuler un bras manipulateur à un pendule simple comme le montre la figure (I.7)

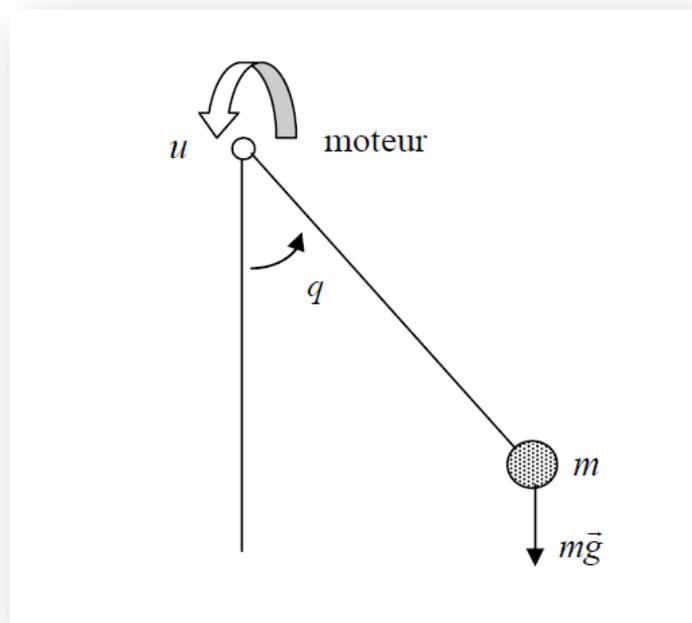


Figure II.7 : Système articulé à un degré de liberté de masse m .

Tout d'abord, on va décrire le comportement du bras manipulateur sous forme d'un modèle de connaissance, et pour cela on introduit le Lagrangien suivant [12] :

$$L = E_c - E_p \quad (\text{II.10})$$

$$E_c = \frac{1}{2} ml^2 \dot{q}^2 \quad (\text{II.11})$$

$$E_p = mgl(1 - \cos q) \quad (\text{II.12})$$

Tel que :

E_c : l'énergie cinétique

E_p : l'énergie potentielle

l : la longueur du bras manipulateur

q : position angulaire

On remplacer (I.11) et (I.12) dans (I.10), donc :

$$L = \frac{1}{2} ml^2 \dot{q}^2 - mgl(1 - \cos q) \quad (\text{II.13})$$

Soit l'équation d'Euler Lagrange suivante :

$$\sum_{i=1}^N \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = \Gamma_i \quad (\text{II.14})$$

Avec : $N = 1$: pour un degré de liberté.

$\Gamma = u$: commande à l'entrée du système.

Les équations différentielles sont données comme suit:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} &= ml^2 \dot{q} \\ \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) &= ml^2 \ddot{q} \\ \frac{\partial L}{\partial q} &= -mgl \sin q \end{aligned} \quad (\text{II.15})$$

D'après l'expression de Lagrange, on exprime l'équation du système comme suit :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = u \Rightarrow ml^2 \ddot{q} + mgl \sin q = u \quad (\text{II.16})$$

L'équation du système peut encore s'écrire :

$$\ddot{q} = -\frac{g}{l} \sin q + \frac{1}{ml^2} u \quad (\text{II.17})$$

II.13 - Application de l'Observateur pour un robot manipulateur 1ddl

L'observateur que nous venons d'étudier s'applique parfaitement au modèle d'un bras manipulateur à 1ddl qui s'écrit sous forme triangulaire. Rappelons que le modèle du robot.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau \quad (\text{II.18})$$

Peut être représenté par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = f(\theta, \dot{\theta}) + B(\theta)u \\ y = h(\theta) \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

$$\text{Avec : } f(\theta, \dot{\theta}) = -M^{-1}(\theta)(V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta))$$

$$B(\theta) = M^{-1} \text{ et } y = \theta$$

II.13.1- Mise sous forme triangulaire du modèle dynamique

Pour écrire l'observateur sous forme triangulaire, il faut choisir pour cela le vecteur d'état $x = [\theta \quad \dot{\theta} \quad \ddot{\theta}]^T$ comme vecteur de commande u

En posant $x_1 = \theta$, $x_2 = \dot{\theta}$ modèle dynamique sous forme triangulaire [4]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(\theta) + Bu \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

II.13.2- Observation en mode glissant sous forme triangulaire

Dans ce chapitre, un observateur non linéaire en mode glissant est proposé en vue de la commande d'un robot manipulateur à deux articulations. Il donne une erreur d'observation asymptotique linéaire et stable. La classe des systèmes pour lesquels il est conçu peut-être considérée comme une forme triangulaire d'observation. Le but est d'assurer la stabilité du robot dans la perspective d'une commande robuste et rapide.

L'observateur sous forme triangulaire associé au système (II.20) s'écrit :

Avec :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + \lambda_1 \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = f + Bu + \lambda_2 \text{sign}(\bar{x}_2 - \hat{x}_2) \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$\bar{x}_1 = x_1$$

$$\bar{x}_2 = \hat{x}_2 + \lambda_1 \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1)$$

L'erreur d'observateur : $e = (x - \hat{x})$

II.14 -Conclusion

La première partie de ce chapitre a été dédiée à la présentation des mots clés les plus importants en diagnostic. La surveillance d'un équipement industriel se fait au travers de deux fonctions de base : la détection et le diagnostic des défaillances. La détection des défaillances a pour rôle de signaler toute situation autre qu'une situation nominale. En d'autres termes, tout ce qui n'est pas normal doit être classé comme anormal. C'est alors que la fonction diagnostic doit localiser l'organe défaillant et identifier les causes ayant provoqué ces situations de défaillance. Cette opération est souvent menée par un expert et dans certains cas exige des connaissances poussées sur l'équipement.

On s'intéresse au problème de détection et d'estimation des défauts pour les robots manipulateurs.

Chapitre III:

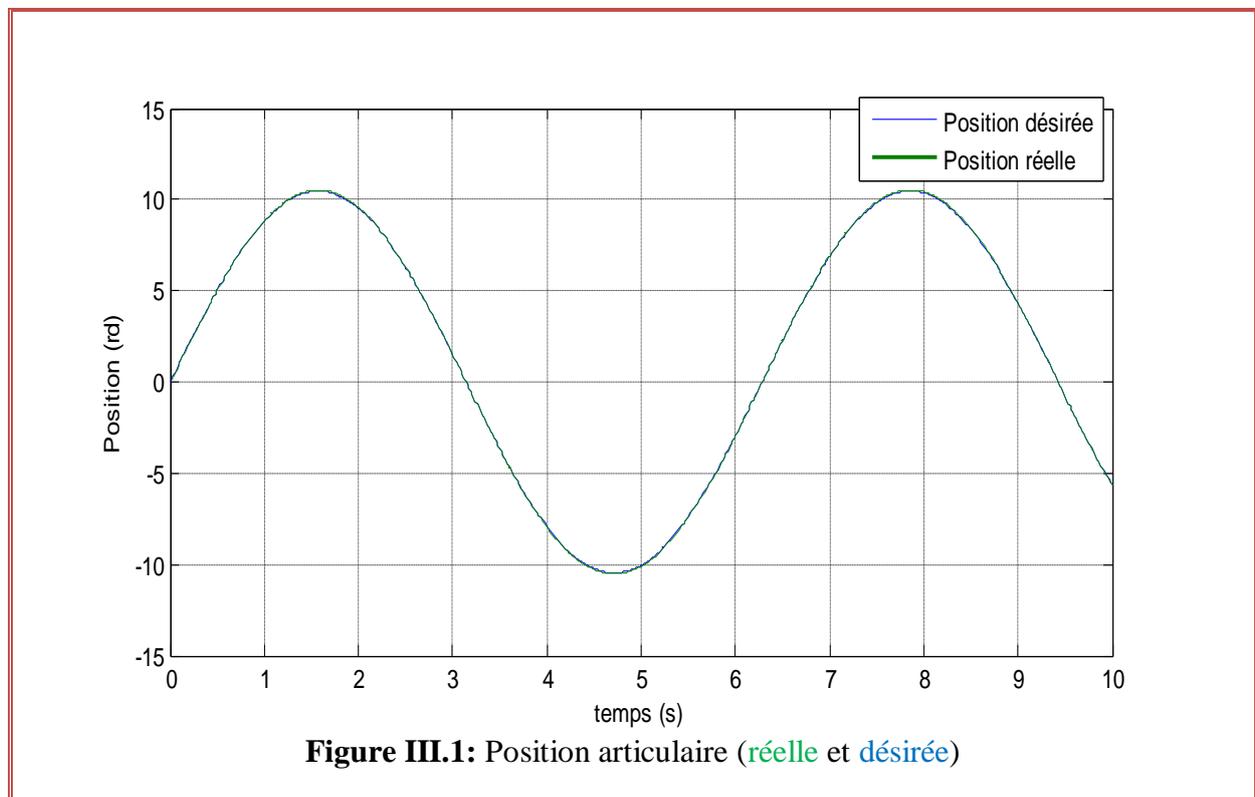
Tests et validation

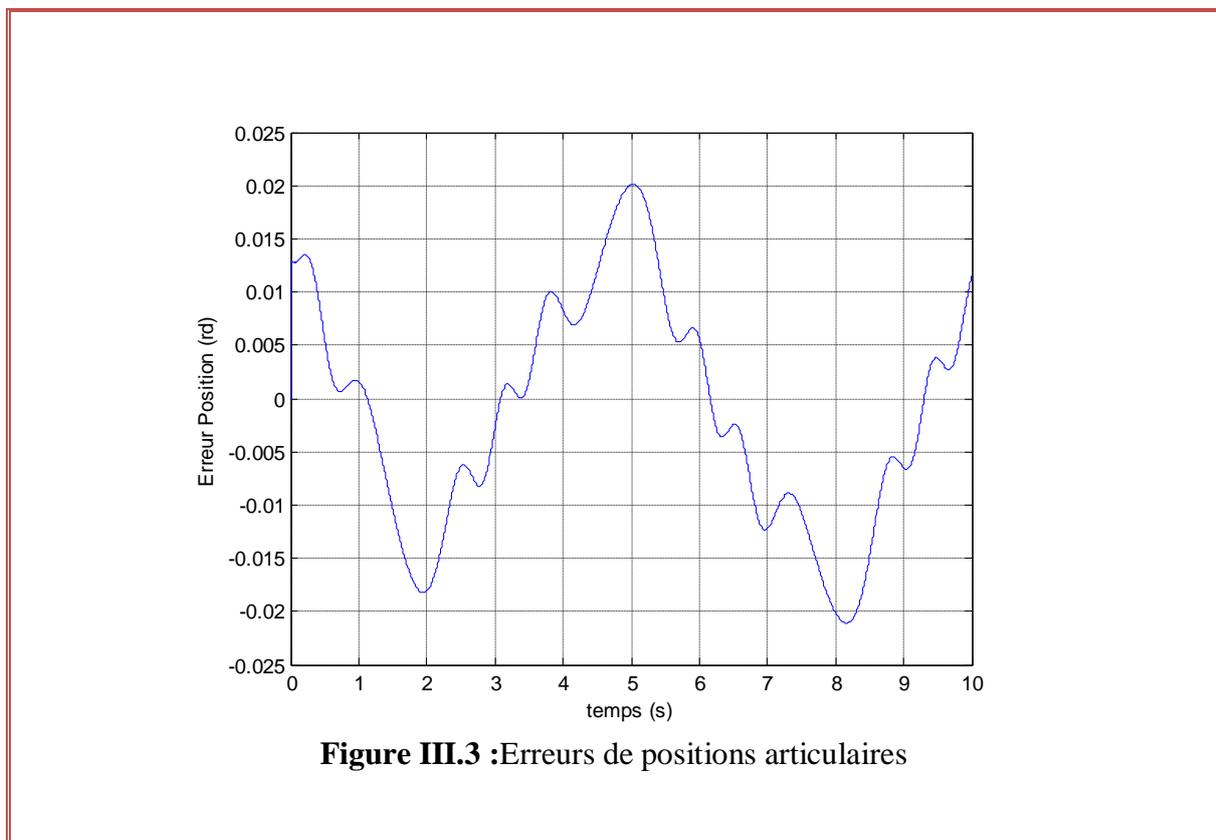
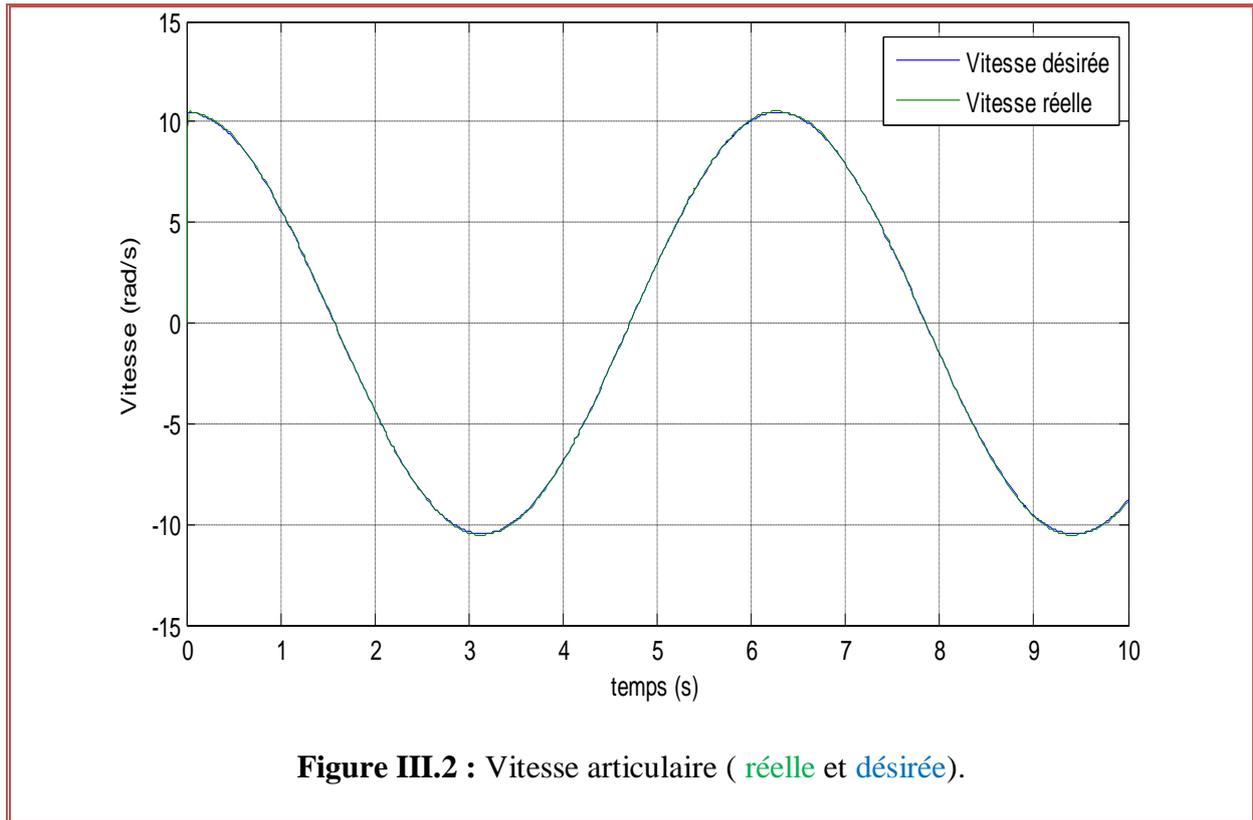
III.1- Introduction

Dans ce chapitre nous exposerons les résultats de la méthode adoptée pour réaliser le diagnostic sur un bras manipulateur d'un robot 1ddl.

Des simulations ont été effectuées sous l'environnement Matlab/Simulink afin de tester les performances du bloc de détection/estimation des défauts. Différents cas de figures ont été considérés. Dans un premier temps, les incertitudes de modélisation ont été négligées. Les figures (III.5), (III.6), et (III.7), illustrent le comportement des différents résidus ainsi que les performances du système de commande en absence de défauts. Quant aux figures (III.11)-(III.12), (III.13), (III.14), (III.15) et (III.16), elles représentent les variations des résidus ainsi que les positions et vitesses articulaires lorsqu'un défaut actionneur ou composant apparaît. (Les détails concernant les paramètres de simulation et les défauts considérés peuvent être consultés en annexe.

D'autre part, nous avons voulu montrer l'effet des incertitudes de modélisations sur les performances du système de détection, en absence de défauts. Ceci est représenté sur les figures (III.8), (III.9) et (III.10).





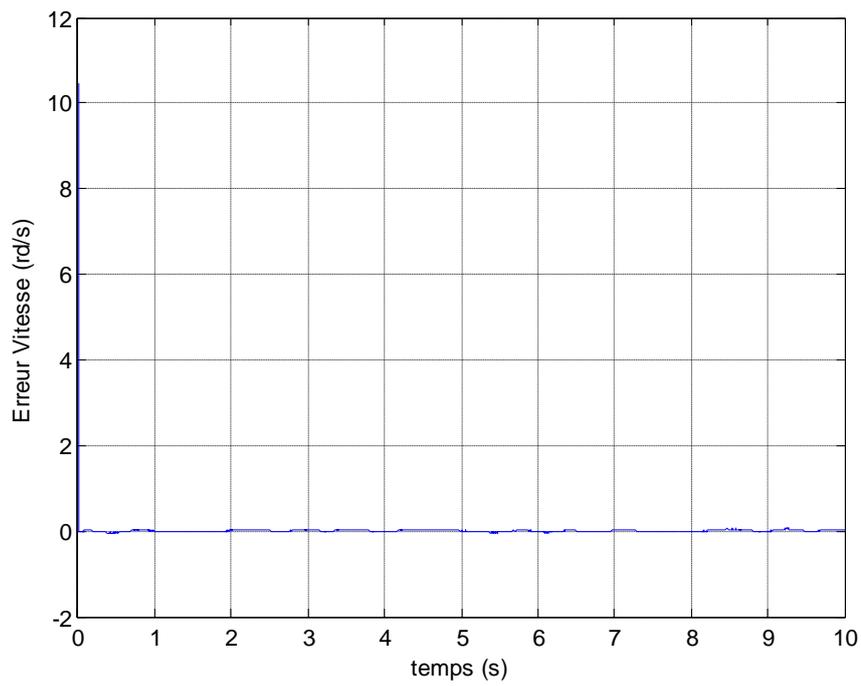


Figure III.4 : Erreurs de vitesses articulaires

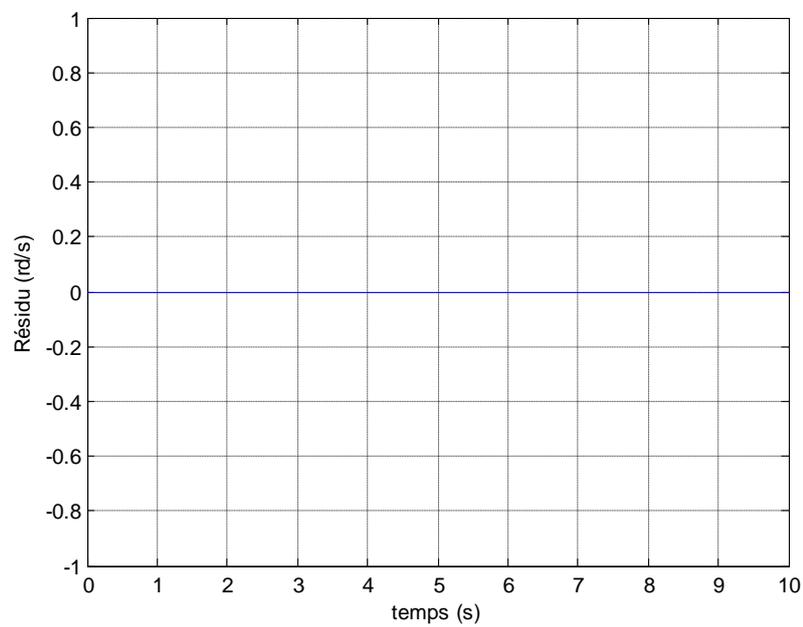


Figure III.5 : Représentation de résidu : Absence des défauts et d'incertitudes

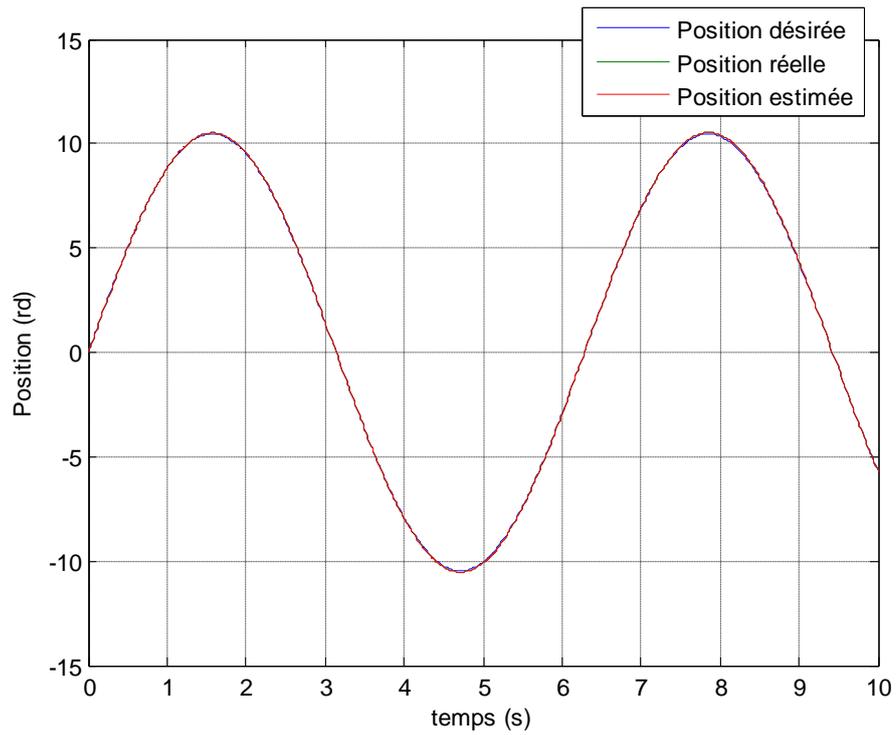


Figure III.6 : Représentation de position : Absence des défauts et d'incertitudes.

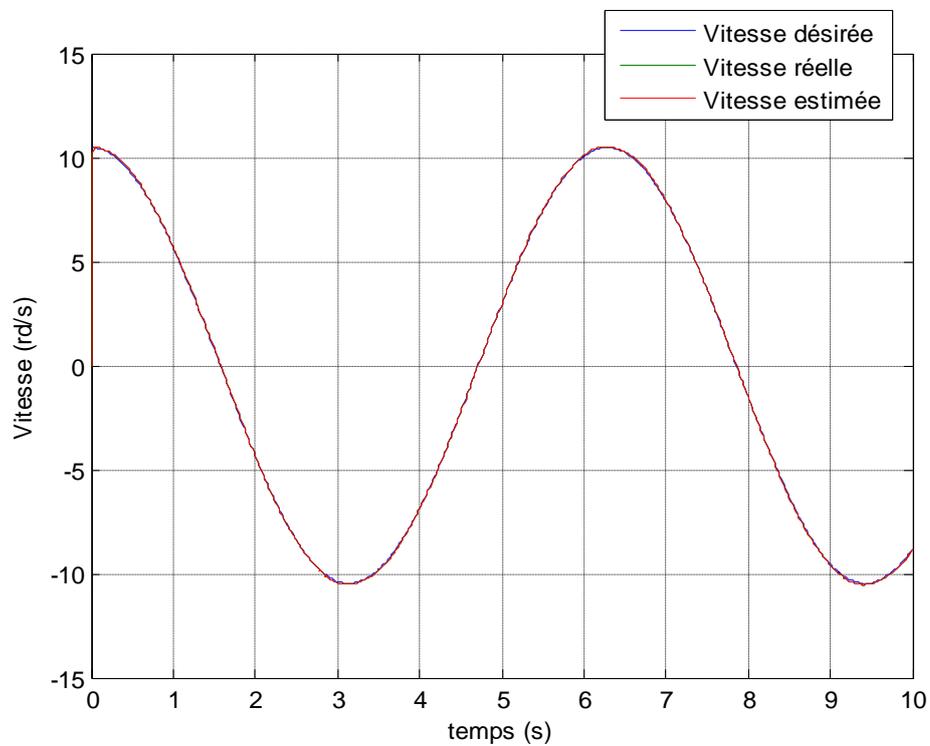


Figure III.7 : Représentation de vitesse : Absence des défauts et d'incertitudes.

❖ INTERPRETATIONS ET COMMENTAIRES

Les figures (III.1), (III.2), (III.3),(III.4), (III.5),(III.6) et (III.7)représentent le cas idéal se traduisant par l'absence des défauts et des incertitudes. Nous constatons que dans ce cas, les erreurs (différence entre la valeur désirée et réelle) et le résidu sont nuls et que la position et la vitesse suivent parfaitement les trajectoires sinusoïdales désirées. Les objectifs de la commande(PID) sont donc réalisés.

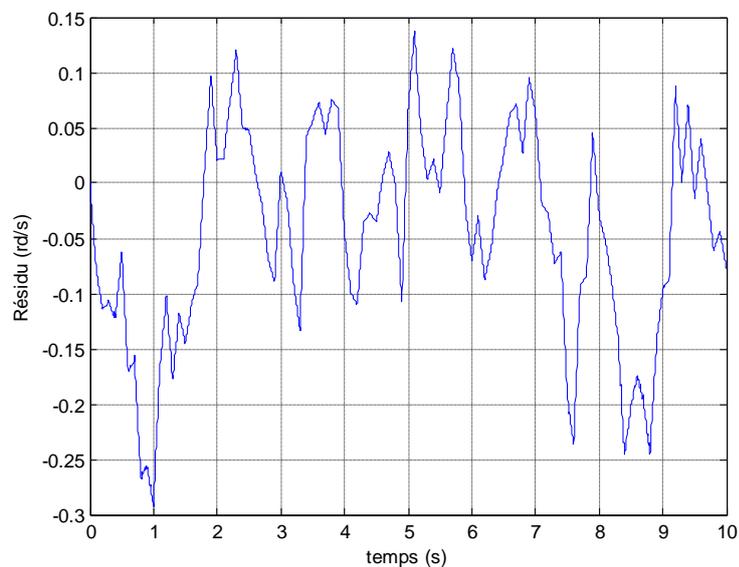


Figure III.8 : Représentation des résidus : Absence de défauts mais présence d'incertitudes.

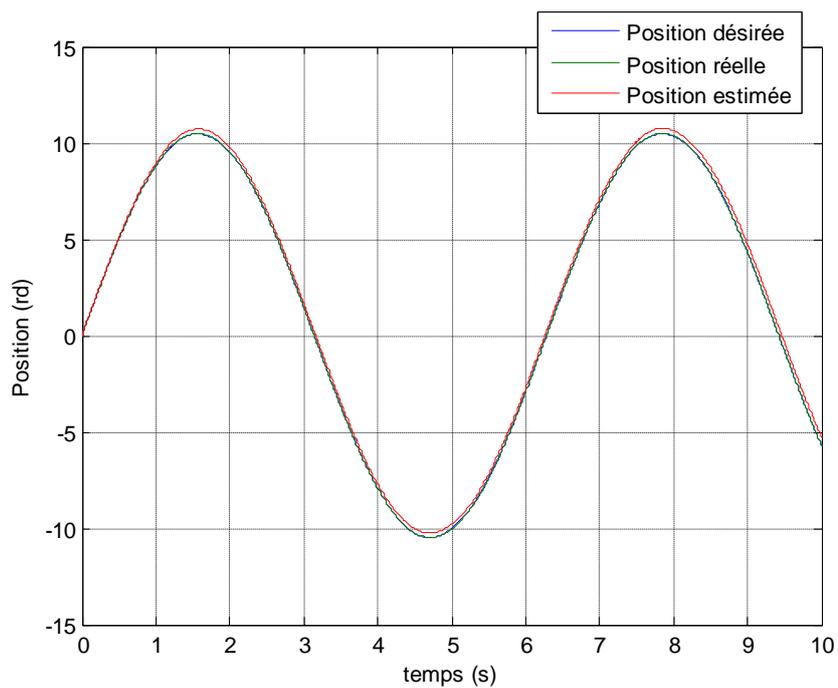


Figure III.9 : Représentation des positions : Absence de défauts mais présence d'incertitudes.

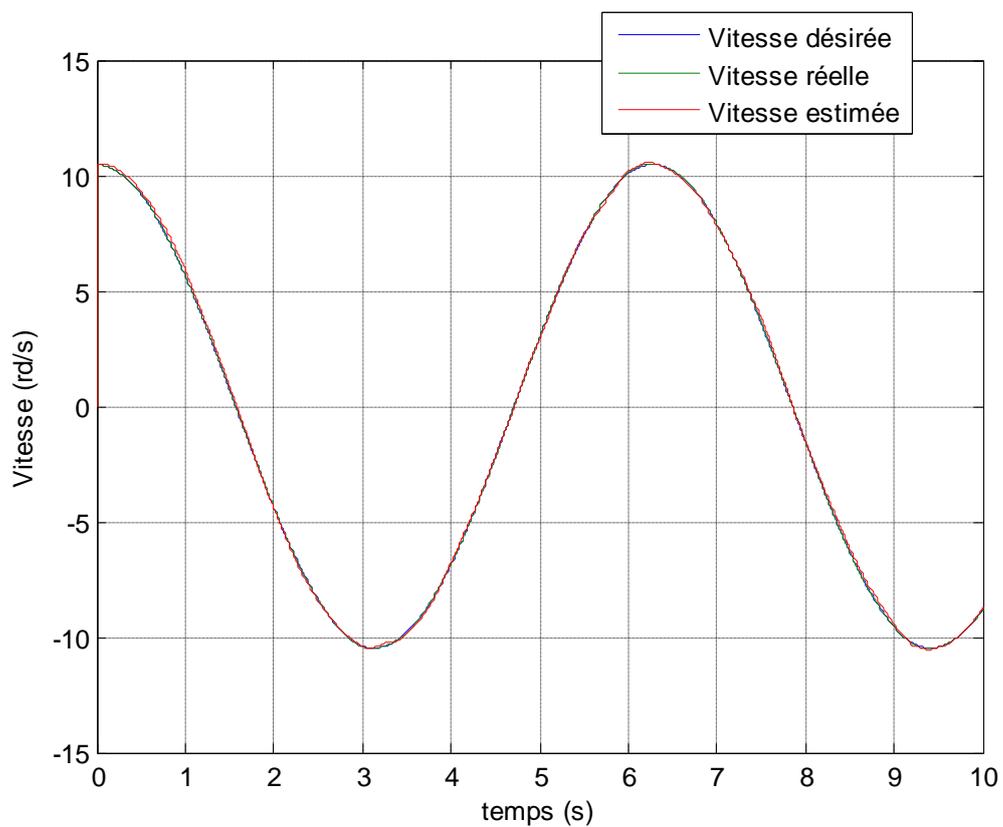


Figure III.10 : Représentation des vitesses : Absence de défauts mais présence d'incertitudes.

❖ INTERPRETATIONS ET COMMENTAIRES

Les figures (III.8), (III.9) et (III.10), illustrent les résultats des simulations effectuées dans le cas d'un système sain, mais soumis à des incertitudes de modélisation. Nous constatons que les performances du système de régulation sont maintenues du moment que lors du calcul de la loi de commande. Par conséquent les objectifs de poursuite sont maintenus.

Il faut noter que le résidu varie et s'éloigne de zéro. Alors le résidu est sensible aux incertitudes de modélisation. Ce qui engendre de fausses alarmes et des détections erronées.

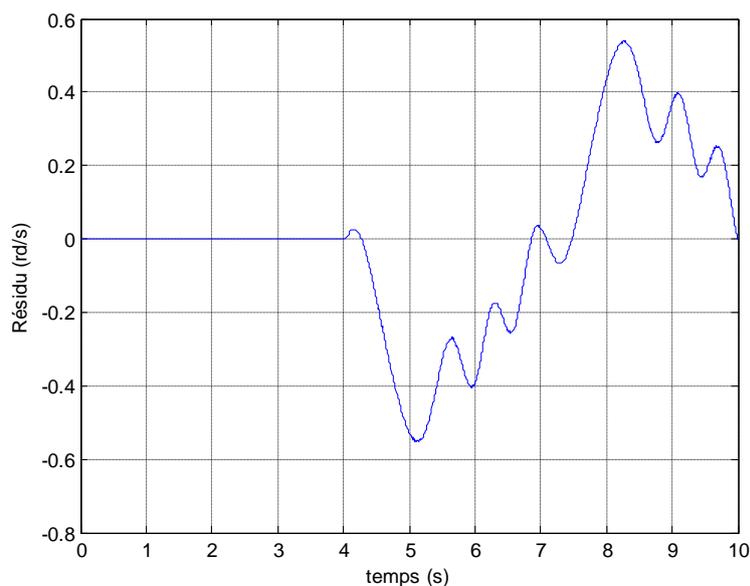


Figure III.11 : Représentation des résidus : Apparition de défaut actionneur à $t=4$ sec.

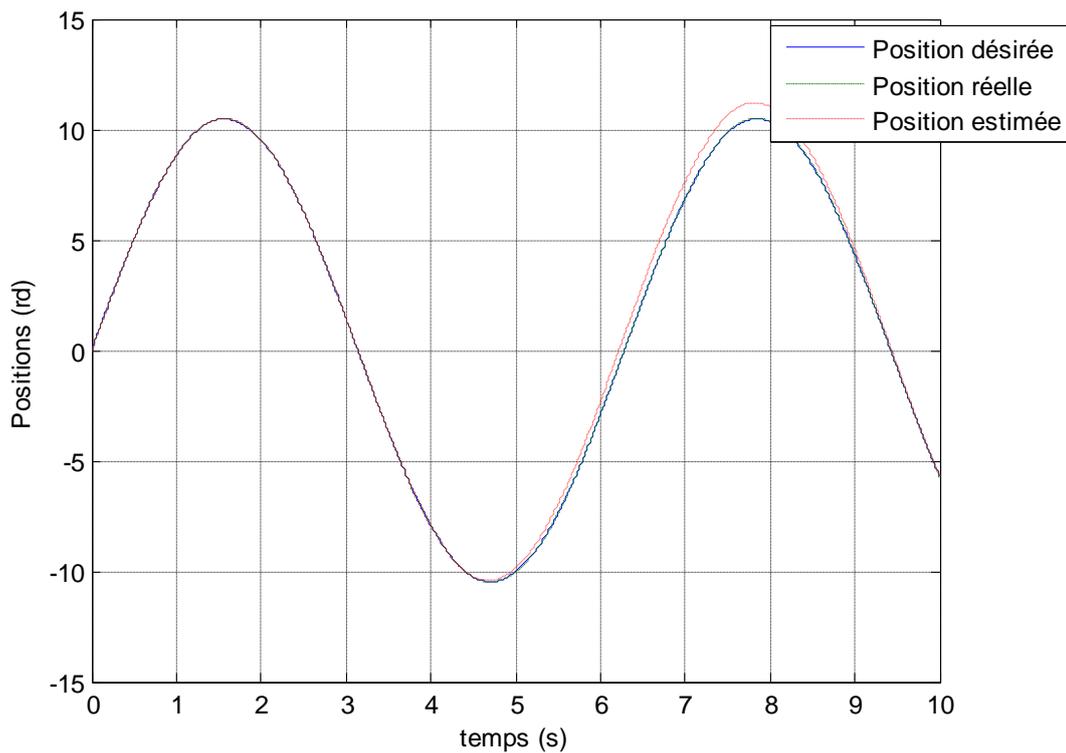


Figure III.12 : Représentation des positions : Apparition de défaut actionneur à $t = 4$ sec.

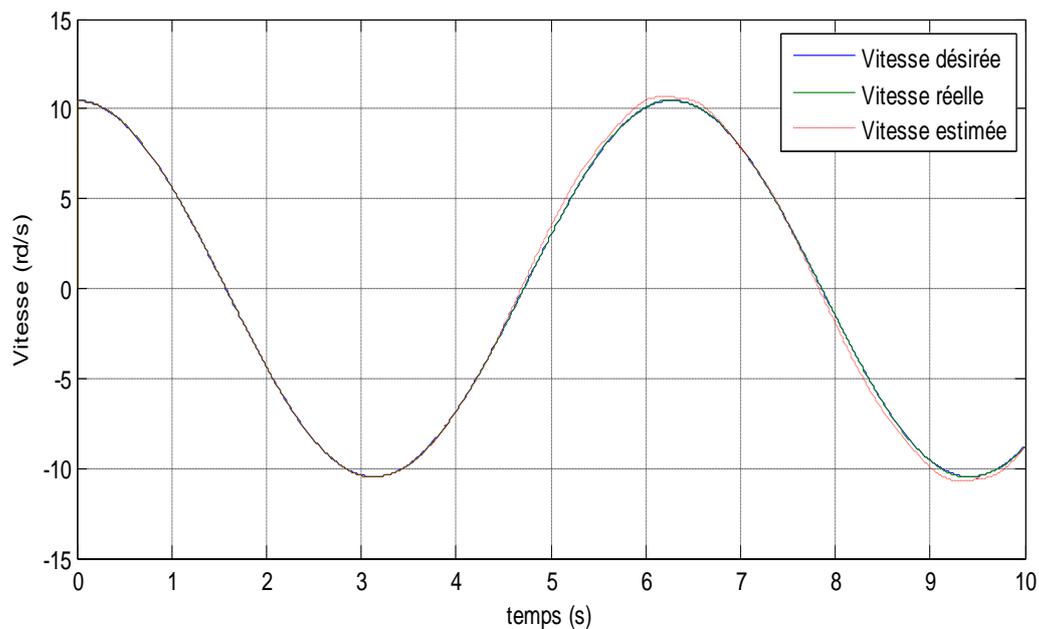
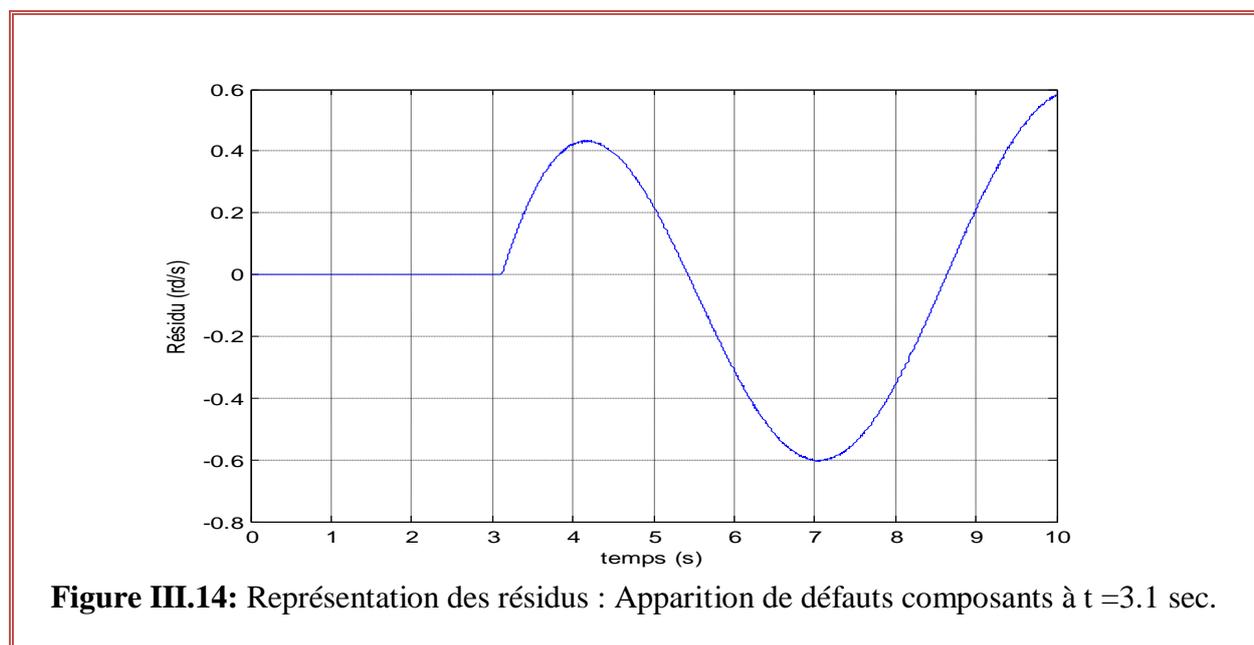


Figure III.13: Représentation des vitesses : Apparition de défaut actionneur à $t = 4$ sec.

❖ INTERPRETATIONS ET COMMENTAIRES

A travers les figures (III.11), (III.12) et (III.13), qui illustrent les variations de résidu et des états du système, dans le cas de l'apparition de défauts actionneurs à $t = 4$ sec mais toujours en supposant que les incertitudes sont nulles, nous remarquons que le résidu s'écarte de zéro à partir de cet instant, indiquant ainsi l'apparition de défaut.

Or les performances du système de commande sont maintenues .



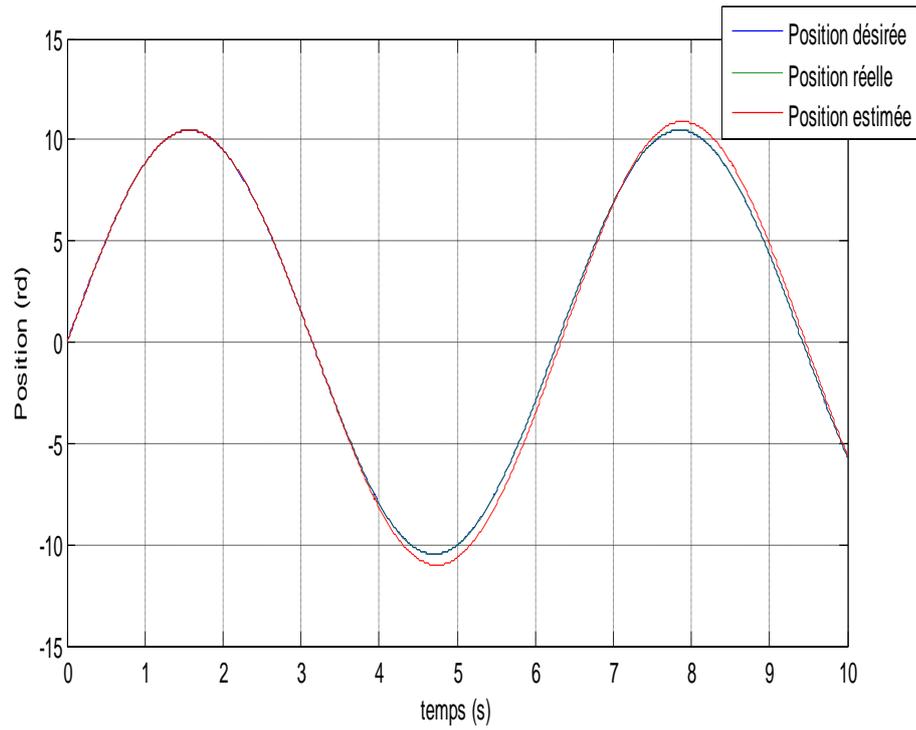


Figure III.15: Représentation des positions : Apparition de défauts composants à $t = 3.1$ sec

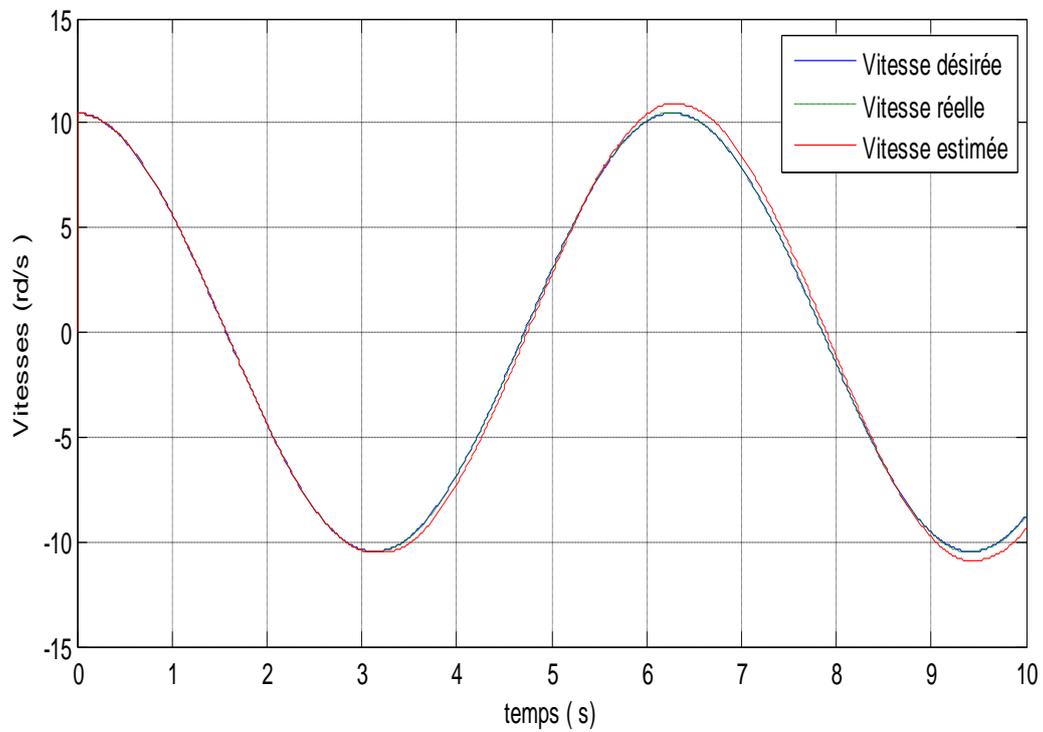


Figure III.16: Représentation des vitesses : Apparition de défauts composants à $t = 3.1$ sec.

❖ INTERPRETATIONS ET COMMENTAIRES

Les figures (III.14), (III.15) et (III.16) représentent le cas où des défauts composants apparaissent à l'instant $t=3.1\text{sec}$, toujours en négligeant les incertitudes de modélisation.

III.2-Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé les résultats d'une méthode de diagnostic à base d'observateur mode glissant sous forme triangulaire, appliquée au bras manipulateur à un degré de liberté.

A travers les différentes simulations, nous avons constaté que l'approche présente des résultats satisfaisants. Elle permet effectivement une bonne surveillance du système, du moment que l'apparition d'un défaut est détectée rapidement et efficacement.

Conclusion générale

La méthode de diagnostic à base d'observateur à mode glissant sous forme triangulaire a été appliquée pour la détection des défauts actionneurs et composants des robots manipulateurs.

La conception d'observateurs pour les systèmes non linéaires est une tâche assez difficile. Comme nous l'avons vu au cours du premier chapitre, la méthode d'estimation à base d'observateurs à mode glissant est l'approche qui a le plus de tendance à se généraliser sur des classes assez larges de système non linéaire.

L'objectif de deuxième chapitre est de présenter les différents types de défauts rencontrés dans les systèmes de commande, la manière de les modéliser ainsi que leur comportement. Nous avons, présenté la procédure de détection des défauts à base de modèle mathématique qui revient à un problème de génération de résidus. Pour résoudre ce problème on applique l'observateur à mode glissant sous forme triangulaire.

Dans le dernier chapitre, nous avons exposé les résultats de la méthode adoptée pour réaliser le diagnostic sur un bras manipulateur 1ddl.

Les résultats de simulation montrent que l'application de cette méthode permet la détection de différents types de défauts (Actionneurs et composants) et à temps réel.

En réalité, il est important de tenir compte des incertitudes pour éviter les fausses alarmes et les détections erronées. C'est dans ce but, qu'un seuil de détection peut être introduit.

Les perspectives proposées pour la suite de ce travail sont :

- Appliquer l'observateur mode glissant sous forme triangulaire à un robot scara à trois degrés de liberté.
- Essayer d'utiliser l'observateur à mode glissant pour reconstruire les défauts actionneurs et capteurs. En effet la phase de détection et de localisation des défauts, bien qu'elle soit nécessaire, n'est pas suffisante pour garantir la sûreté de

fonctionnement. Il est indispensable de modifier la loi de commande en temps réel afin de maintenir la stabilité et de garantir au mieux les performances du système.

- Résoudre les problèmes de diagnostic à base d'observateurs par l'utilisation de l'intelligence artificielle.

Bibliographie

- [1] Rodolfo ORJUELA « Contribution à l'estimation d'état et au diagnostic des systèmes représentés par des multi modèles » thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine. 2008.
- [2] AKHENAK. A « Conception d'observateurs non linéaires par approche multimodèle application au diagnostic » thèse Doctorat. Centre de recherche en automatique de NANCY. 2004
- [3] Mr. ABDOUNE ABDELKRIM «Commande à structure variable par Observateur D'un robot manipulateur rigide de type SCARA» thèse magister en automatique. Université d'Oranes-senia. 2014.
- [4] ALAOUI.M « Commande et observateur par mode glissant d'un système de pompage et d'un bras manipulateur » thèse de Doctorat .Université de Fès.2009
- [5] XU.A. « Observateurs adaptatifs non linéaires et diagnostic de pannes » thèse de Doctorat . Université de Rennes .2002.
- [6] BOUKHOBZA.T « Observateur à mode glissant et forme d'observabilité et analyse et synthèse des commande par ordres supérieurs » thèse PhD .Laboratoire des signaux et systèmes .Université de Paris-Sud Orsay.1997.
- [7] HAKIKI.K, MAZARI.B, DJABER.S, « Observation par mode glissant sous forme triangulaire à ingestion de sortie d'un robot pneumatique » (L.A.AS) ENSET-ORAN .
- [8] NAIT SLIMANI.B, « Synthèse d'observateur non linéaire : application au diagnostic des défauts » thèse de magister .Université TiziOuzou .
- [9] SLTINE.J.J. « Sliding controller design for nonlinear system »Int.Jour.of Cont, 1984.
- [10] KERBOUA. A, « Commande et observateurs par mode glissant : Application a une machine asynchrone alimentée en tension » thèse de magister.ENP 1999.
- [11] OUARHLENT.S « Diagnostic de panne dans les systèmes robotisés » mémoire de magister. Université de batna.2009.
- [12] ALAOUI .M. C.S. « commande et observateur par mode glissants d'un système de pompage et d'un bras manipulateur ». Thèse de doctorat. Université de Fès. 2009.
- [13] G. Zwingelstein, « Diagnostic des défaillances : Théorie et pratique pour les systèmes Industriels », Edition Hermès, 1995.
- [14] M. Combacau, « Commande et surveillance des systèmes à événements discrets complexes : application aux ateliers flexibles », thèse de Doctorat, Université P.Sabatier de Toulouse 1991.

- [15] A. Villemeur, « Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels », Edition EYROLLES, Collection DER-EDF, Volume 67, 1988.

A.1 Modélisation du robot à un degré de liberté [12]

Le robot étudié est un robot manipulateur à un degré de liberté, avec certaines hypothèses de fonctionnement .

Soient les hypothèses suivantes :

- ✓ Aucun défaut ni incertitude.
- ✓ Liaisons rigides.
- ✓ Structure rigide.
- ✓ Aucune charge à l'extrémité.

Le modèle dynamique du robot est donné par (formalisme d'Euler-Lagrange) :

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau$$

Tels que :

- τ : Vecteur des couples appliqués aux articulations $\in R^n$;
- \ddot{q} : Vecteur des accélérations articulaires $\in R^n$;
- \dot{q} : Vecteur des vitesses articulaires $\in R^n$;
- q : Vecteur des vitesses articulaires $\in R^n$;
- $M(q)$: Matrice d'inertie $\in R^{n \times n}$;
- $g(q)$: Vecteur de force de gravité $\in R^n$;
- $C(q, \dot{q})$: Matrice des forces centrifuges et de Coriolis $\in R^{n \times n}$.

L'équation du système peut s'écrire :

$$\ddot{q} = -\frac{g}{l} \sin q + \frac{1}{ml^2} u$$

A.2 Paramètres du robot

Les simulations ont été effectuées pour un robot à un degré de liberté, défini par les paramètres suivants :

$$l = 1m \quad , \quad m = 0.5kg \quad , \quad g = 9.5 m/s^2$$

l : désigne la longueur de bras , m : désigne la masse du corps

A.3 Paramètres de la commande PID

L'équation du couple s'écrit : $\tau = K_p(\theta_d - \theta) + K_D(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_I \int(\theta_d - \theta)dt$

Où K_p, K_I et K_D sont des matrices constantes, diagonales et positives de dimension $n \times n$, n représente le degré de liberté (nombre d'articulations).

$$K_p = 3200 \quad , \quad K_I = 3200 \quad , \quad K_D = 3200$$

A.4 Défauts actionneurs et défauts composants

- Le défaut actionneur engendre un affaiblissement du couple :

$$F_A = \alpha \tau \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad \text{Avec } \alpha = 0.04$$

- Le défaut composant (Frottement visqueux) est donné par :

$$F_C = \alpha \dot{\theta} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad \text{Avec } \alpha = 0.08$$