



UNIVERSITE DE BATNA
FACULTE DE LA TECHNOLOGIE
Département de Génie Electrique



Mémoire

Présenté en Vue de l'Obtention de Diplôme de

Magistère en Electronique

Option : **Robotique**

Par : **IKNI Samir**

Thème

**Diagnostic de Pannes et Commande
Tolérante Aux Fautes D'un Robot
Manipulateur Télé-Opéré**

Date de Soutenance :/...../2011

Membres du Jury d'Examination :

- | | | | |
|----------------------------|--------|---------------------------|-------------------|
| ◆ Dr ATHAMENA Nouredine | MC 'A' | Université de Batna | Président de Jury |
| ◆ Dr MESSAI Abderraouf | MC 'A' | Université de Constantine | Examineur |
| ◆ Dr ABDESSEMED Yassine | MC 'A' | Université de Batna | Rapporteur |
| ◆ Dr KHIREDINE Mohammed S. | MC 'A' | Université de Batna | Examineur |
| ◆ Dr AOUGHELNET Said | MC 'A' | Université de Batna | Examineur |



Dédicaces

A mes très chers parents

A toute la famille

A ma fiancée

A tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à ma formation

Remerciements

Je tiens à exprimer ici toute mes reconnaissances à mon professeur Mr.Yassine ABDESSEMED pour l'honneur qu'il m'a fait en assurant la direction et le suivi scientifique et technique du présent mémoire.

Je le remercie non seulement pour sa grande contribution à l'aboutissement de ce travail et pour sa disponibilité malgré ses nombreuses activités. Mais aussi pour sa grande générosité.

Je remercie vivement le président et les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce modeste travail.

Mes remerciements s'adressent également à Mr AISSI Salim et Mr. MAOUCHA Abdallah pour leurs aides et leurs soutiens.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : La téléopération avec retour d'effort	
I-1 Introduction	4
I-2 bref historique	4
I-3 Les systèmes de téléopération avec retour d'effort	5
I-3-1 Le but de conception des systèmes de téléopération	5
I-3-1-1 Définition de la stabilité et de la transparence des systèmes téléopération	5
I-3-2 Modélisation des télémanipulateurs maitre-esclave	6
I-4 la stabilité	8
I-5 La transparence	10
I-6 Architecture de la téléopération	11
I-6-1 Le principe	11
I-6 Structure position-position	14
I-7 Structure force-position	16
I-8 Le retard de transmission et la stabilité	18
I-8-1 L'influence des retards sur les systèmes a retour d'effort	18
Structure position-position	18
Structure force-position	18
I-9 La modélisation de système	18
I-10 La téléopération sans temps de retard	20
I-11 La transparence du système	21
I-12 Stabilisation d'un système de téléopération avec retour d'effort	22
I-13 Elimination de déphasage	24

I-14 Conclusion	25
-----------------------	----

Chapitre II : Diagnostic des défauts et commande tolérante aux défauts

II-1 Introduction.....	26
II-1-1 Définition	26
II-2 Type de défauts	26
II-2-1 Défauts actionneurs	27
II-2-2 Défauts capteurs	27
II-2-3 Défauts systèmes ou composants	27
II-3 Modélisation des défauts	28
II-4 Méthodes de diagnostic	29
II-4-1 Méthodes de diagnostic sans modèle mathématique	29
II-4-2 Méthodes de diagnostic avec modèle mathématique	30
II-4-2-1 Redondance physique et analytique	31
Redondance physique	31
Redondance analytique	32
II-4-2-2 Les approches par l'estimation des paramètres	32
II-5 Principe d'un générateur de résidu	34
II-5-1 Génération de résidus	34
II-5-2 Détection et localisation des défauts	35
II-6 Système tolérants aux défauts	38
II-6 -1 Classification des approches FTC	38
II-6 -2 Approche passive de la commande FTC	38
II-6 -3 Approche active de la commande FTC	39
II-6 -4 L'architecture d'une commande FTC active	39
II-7 Conclusion	40

Chapitre III : Commande tolérante aux fautes d'un bras manipulateur téléopéré

III-1 Introduction	41
III-2 Modélisation du système	41
III-2-1 Modèle du robot manipulateur	41
III-2-2 Classification des défauts	42
III-2-3 Modélisation des défauts	43
III-3 Structure de la TFC	45
III-3-1 Détection et l'estimation des défauts	46
III-3-1-1 Détection des défauts	47
III-3-1-2 Estimation des défauts et prise de décision	48
III-3-1-3 Prise de décision	49
III-3-2 Bloc de contrôle	49
III-4 Le système de téléopération complet	50
III-5 Conclusion	51

Chapitre IV : Résultats de simulation

IV-1 Introduction	52
IV-2 Modèles du système simulé sous MATLAB/SIMULINK	52
IV-3 Influence des défauts sur le fonctionnement du système	57
➤ interprétation des résultats	I 59
IV-4 Fonctionnement du système sans défauts	60
Interprétation des résultats	65
IV – 5 Fonctionnement du système suite à de défauts actionneurs	66
➤ interprétation des résultats	I 71

IV – 6 Fonctionnement du système suite à des défauts composants	72
➤	
Interprétation des résultats	77
IV-7 Conclusion	77
Conclusion Générale	78
Bibliographie	79
Annexe	

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'évolution de la technologie d'aujourd'hui, a permis à l'homme de chercher à concevoir et à réaliser des robots pour l'assister, intervenir à distance ou de le remplacer dans la réalisation de nombreuses tâches. Une recherche orientée vers l'imitation de l'homme, qui exige la contribution de plusieurs techniques de la technologie avancée dans la réalisation de la structure en question (Robots). Parmi ces techniques en trouve :

- La téléopération, qui permet le raccordement entre l'homme et le Robot.
- Le diagnostic, qui permet d'assurer la sûreté de fonctionnement.
- La commande et la commande tolérante aux fautes, une étape qui permet au robot de réaliser la tâche dont il est conçu pour la réaliser avec ou sans un degré d'autonomie de l'opérateur humain.

Un système de téléopération est composé de deux robots un robot maître, muni d'une poignée que peut tenir un opérateur et un robot esclave, muni d'un organe terminal où se situe un ou plusieurs outils selon la tâche à accomplir. On a défini ainsi, le rôle de la téléopération, qui se situe dans la mesure et la transmission des gestes de l'opérateur humain. La téléopération permet, la réalisation des tâches nécessitant une dextérité (les robots manipulateurs), dans des domaines tels : le nucléaire, le spatial, le sous-marin, ..., etc.

Avec l'évolution rapide des technologies, l'utilisation de la téléopération répond au recours de divers domaines plus sensibles (médical, industriel) qui exigent la maîtrise de la sécurité de fonctionnement et l'efficacité du système. Une exigence qui a accéléré le développement de celle-ci. Actuellement les recherches sont orientées vers la télé présence et la conception des systèmes téléopérés dotés d'une certaine intelligence (les robots commandés à distance auront un certain degré d'autonomie). Le but à atteindre est la mise en œuvre des stratégies permettant la conservation et la maîtrise du comportement dynamique du système commandé en dépit de la présence d'un dysfonctionnement. Parmi ces techniques on peut citer les stratégies de commande tolérante aux défauts.

Un système de commande tolérant aux fautes est un système capable de maintenir la stabilité et un certain degré de performance en présence de défauts [1, 2]. Deux approches ont été distinguées : passive et active. Dans l'approche passive on utilise les techniques du contrôle robuste de manière à ce que le système en boucle fermée reste insensible à un ensemble connu de défauts. Les défauts sont alors pris en compte dans la conception du système de commande. Le contrôleur est donc robuste aux défauts prescrits.

A la différence, l'approche active réagit « activement » sur les défauts en reconfigurant la loi de commande de manière à maintenir la stabilité et les performances du système [3, 4]. Cette approche permet alors de traiter des défauts imprévus mais nécessite une technique de détection et d'isolation de défauts et une méthode de reconfiguration de la loi de commande. Un défaut est un mauvais fonctionnement du système conduisant à une dégradation du procédé et de ses performances. Ces défauts peuvent provenir essentiellement des actionneurs, des capteurs, du contrôleur ou du procédé lui même. Dans l'approche active de la commande tolérante aux fautes, on agit d'une manière active sur ces défauts en reconfigurant la loi de commande. Pour cela, nous avons besoin d'une méthode efficace de diagnostic de défauts, capable de détecter, isoler et identifier le défaut.

Le but de ce mémoire est l'étude et le développement d'une stratégie permettant la récompensation du retards de la transmission, d'assurer un diagnostic en vu d'application d'une commande tolérante aux défauts a un robot industriel distant, de type SCARA 3R.

Le mémoire est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présenterons un bref historique sur les systèmes de téléopération et les différentes architectures favorisant la transparence et la stabilité du système. Ensuite, nous présenterons la modalisation d'une commande à distance d'un bras manipulateur à trois degré de liberté avec retour de force.

Le deuxième chapitre présentera les différents types de défauts rencontrés dans les systèmes de commande, la manière de les modéliser ainsi que les méthodes de diagnostic permettant la détection et l'estimation des défauts.

Le troisième chapitre sera consacré à la classification, la modalisation des défauts pour les bras manipulateurs et la mise en place des procédures assurant la modification des lois de

commande pour chaque cas de défaillance détectable et localisable. L'estimation des signaux de détection (résidus) sera réalisée en utilisant la technique neuronale RBF (*Radial-basis-function*). On présentera le système de téléopération globale, avec les différents blocs de commande.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons les résultats de simulations en se basant sur la commande tolérante aux défauts d'un bras manipulateur distant de type SCARA à trois degrés de liberté (3RRR).

CHAPITRE I

La téléopération avec retour d'effort

I-1 Introduction

La téléopération est probablement la première forme de robotique mise en œuvre. Initialement développés pour l'industrie nucléaire, les premiers télémanipulateurs maître-esclave (TME) étaient des dispositifs purement mécaniques, les mouvements effectués sur le système maître étant répliqués sur le système esclave à l'aide d'une transmission articulaire [5].

Le développement des actionneurs électriques a permis de rompre le lien mécanique entre le maître et l'esclave, donnant naissance à la téléopération telle qu'on l'entend aujourd'hui.

Nous présentons dans ce chapitre les principes structures de la téléopération, dont nous citons les deux plus utilisées à savoir la structure position-position et force- position.

I-2 bref historique

Le premier système de téléopération a été créé par Goertz en 1948, dans l'industrie nucléaire, avec la motivation de manipuler le carburant radioactif. La transmission entre le maître et l'esclave, été purement mécanique opérant a court distance et il transmet à l'opérateur les forces exercés sur la partie terminale via le système de couplage, qui sont insupportables par l'opérateur humain, lors de la manipulation des pièces lourds.

Dans le but de remédier à ces difficultés, le même Goertz a amélioré en 1956, le système de transmission en équipant les deux robots par des actionneurs électriques, des capteurs de positions,..., etc., permettant d'asservir chaque robot sur la position de l'autre.

Suivit par l'implantation des capteurs d'efforts dans les deux robots [15]. Permettant ainsi, l'asservissement du robot esclave sur la position du robot maître, et l'asservissement du robot maître sur les forces de l'esclave.

L'apparition des contrôleurs bilatéraux à ouvrait le champ à de nombreuses améliorations des performances des systèmes de téléopération, de même à élargi leurs champ d'application : domaines comprenant des technologies de l'espace, les explorations sous-

marines, opérations militaires, utilisation matérielle et disposition de rebut de nucléaire/toxique, chirurgie, micro chirurgie, et réadaptations. Récemment, les applications des systèmes de téléopération ont été étendues à la formation, l'éducation, le divertissement, et les secteurs de la réalité virtuelle.

Néanmoins, les problèmes liés aux systèmes téléopération sont nombreux (retour sensoriel, compensation des mouvements physiologiques, le retard de transmission,..., etc.) à résoudre avant de donner à l'opérateur une impression qu'il manipule l'objet distant sans intermédiaire.

I-3 Les systèmes de téléopération avec retour d'effort

I-3-1 Le but de conception des systèmes de téléopération

L'objectif de la recherche et de conception des systèmes de téléopération est de donner de plus en plus l'impression à l'opérateur humain qu'il manipule l'objet distant sans intermédiaire, tout en maîtrisant les forces de contact.

Un but qui exige la satisfaction de la stabilité et la transparence des systèmes de téléopération.

I-3-1-1 Définition de la stabilité et de la transparence des systèmes téléopération

- ***La stabilité :***

La stabilité de système de téléopération est contrainte de fonctionnement primordiale. Elle se définit par le fait que d'un déplacement ou d'un effort borné réalisé par l'opérateur au niveau de l'interface maître, résulte un déplacement ou un effort borné réalisé par le manipulateur esclave au niveau de l'environnement distant.

- ***La transparence :***

La transparence représente un critère de performance d'un système de téléopération [6]. Elle exprime la capacité du système à transmettre avec fidélité la meilleure perception

possible des interactions réalisée entre le manipulateur esclave et l'environnement distant. L'opérateur a alors les mêmes sensations que s'il agissait directement sur l'environnement distant. Ainsi la boucle de téléopération lui paraît inexistante.

I-3-2 Modélisation des télémanipulateurs maître-esclave

A partir d'une analogie avec l'électricité, le système de téléopération peut être modélisé par un ensemble de blocs en cascade, représentant le site maître, le site esclave et entre les deux le réseau de communication identifié par un quadripôle à deux ports de matrice hybride H.



Figure I-1 : Schéma générale d'un télémanipulateur.

On considère par la suite le schéma général de la figure (I-1) et on se place dans le contexte de la téléopération bilatérale, le manipulateur maître étant un dispositif à retour d'effort. Il est classique d'adopter cette représentation sous forme de quadripôle pour faire apparaître les relations entre les différents éléments qui interagissent, ainsi que les données transmises [26].

Les symboles V et F représentent respectivement les vitesses et les forces. Les indices h, m, s et e représentent respectivement l'opérateur humain, le manipulateur maître et l'esclave, et l'environnement.

La particularité d'un système télémanipulateur bilatéral, réside dans le fait qu'un tel système comporte différents boucles de rétroactions qui utilisent la perception de l'utilisateur perception haptique et virtuelle. L'utilisateur en interaction avec le télémanipulateur est l'élément de chaîne le moins connu, le plus variant, et finalement le moins facile à modéliser. Outre les facteurs purement physiologiques (forces, sensibilité, vitesse de réaction), il existe d'autres paramètres dont il est bien plus difficile encore de rendre compte, comme par

exemple son expérience. L'environnement avec lequel le robot esclave interagit est aussi relativement mal connu en général. A part ces deux facteurs principaux, la maîtrise de la commande d'un télémanipulateur est aussi techniquement délicate pour les deux raisons :

La possible présence du retard dans la ligne de transmission et la relative complexité du système à fortiori dans le cas de système aux mobilités. La modélisation sous forme de quadripôle, emprunté à la théorie des systèmes électriques, est particulièrement bien adaptée à l'étude des télémanipulateurs, comme on peut le comprendre d'après la figure (I-1).

En regroupant le robot maitre, le canal de communication, la commande et le robot esclave en un seul sous système on obtient le schéma de la figure (I-2), qui mit ainsi les efforts externes au TME, décrits comme des entrées exogènes [6]. L'effort d'intention de l'opérateur est noté F_h^* et l'effort appliqué par l'environnement F_e^* .

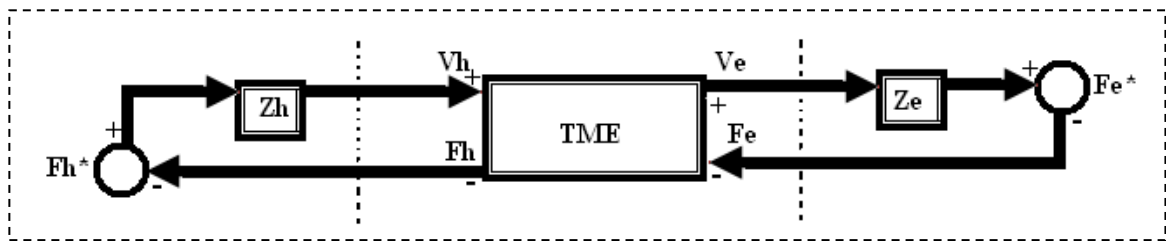


Figure I-2 : Modélisation du télémanipulateur avec entrée exogène.

Dans ce schéma l'impédance de l'utilisateur et celle de l'environnement, notée respectivement Z_h et Z_e , sont définies par :

$$Z_h = - F_h / V_h \tag{I-1}$$

$$Z_e = F_e / V_e \tag{I-2}$$

La représentation sous forme de quadripôle est commode pour mettre sous différentes formes matricielles les relations entre les efforts et les vitesses du système, selon les grandeurs que l'on souhaite mettre en rapport. L'une d'elles, la matrice hybride H, sera exploitée dans la suite du chapitre. Elle décrit le couplage entre les variables de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix} F_h \\ -V_e \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} V_h \\ F_e \end{pmatrix} \tag{I-3}$$

Les quatre paramètres de la matrice hybride H :

$$H_{11} = F_h / V_h \left| \begin{array}{l} \\ F_e = 0 \end{array} \right. \quad (I-4)$$

$$H_{12} = F_h / F_e \left| \begin{array}{l} \\ V_h = 0 \end{array} \right. \quad (I-5)$$

$$H_{21} = - V_e / V_h \left| \begin{array}{l} \\ F_e = 0 \end{array} \right. \quad (I-6)$$

$$H_{22} = - V_e / F_e \left| \begin{array}{l} \\ V_h = 0 \end{array} \right. \quad (I-7)$$

Possèdent une interprétation physique intéressante, par analogie avec les quadripôles électriques, [7]. Ainsi H_{11} , correspond à l'impédance perçue par l'utilisateur lors du mouvement en espace libre, H_{22} traduit l'influence dynamique de l'environnement sur le TME et H_{12} (respectivement H_{21}) représente la dynamique du suivi en effort (respectivement en vitesse) du TME [8].

Les performances d'un système de téléopération caractérisent notamment l'immersion qu'il procure à son utilisateur. Bien que ceci nécessite quelques précisions à venir, on peut dire que le système de téléopération doit autoriser simultanément un suivi fidèle en effort et en vitesse entre le maître et l'esclave, tout en garantissant la stabilité dans toutes conditions d'utilisations.

I-4 La stabilité

L'étude de la stabilité d'un système de téléopération est un problème délicat en raison notamment de l'interaction avec un opérateur humain dont le comportement est incertain et avec un environnement caractérisé par de fortes non linéarités. Dans ce contexte, l'approche la plus efficace consiste à utiliser le concept de passivité, d'usage très courant en téléopération.

Cette notion est très pratique pour des systèmes interconnectés, modélisés sous formes de quadripôles. Ceci s'explique par le fait que l'interconnexion de systèmes passifs donne un système asymptotiquement stable. Sous l'hypothèse que l'opérateur et l'environnement sont

passifs, il suffit donc de montrer que le système de téléopération est passif pour prouver la stabilité globale. Un système de téléopération est passif si [9]:

$$\int_{-\infty}^t [(U_h(\tau)F_h(\tau) - V_e(\tau)F_e(\tau))] d\tau \geq 0, \quad \forall t \geq 0$$

(I-8)

Dans le cas d'un système linéaire et invariant, il est possible de caractériser de façon plus constructive par la stricte positivité de la fonction de transfert [10]. Bien que l'approche passive soit le plus souvent utilisé, elle conduit néanmoins à des conditions de stabilité conservatrices et donc à des performances limitées. Les travaux d'al et d'Adams [11] sur la stabilité du retour d'effort lors d'interaction avec un environnement virtuel étendus aux systèmes de téléopération par *Hashtrudi- Zaad* et *Salcudean* [12] fournissent des conditions de stabilité moins conservatives. Un système linéaire sous forme de quadripôle est dit inconditionnellement stable en mode couplé s'il n'existe pas de terminaison passive de type dipôle telle que le système couplé soit instable. de cette définition résultent des propriétés assez similaire à celle de la passivité. En particulier l'association d'un système de téléopération inconditionnellement stable en mode couplé avec un environnement et un opérateur passifs conduit à un système globalement stable. Par analogie avec les réseaux électriques, la stabilité inconditionnelle en mode couplé est étudiée à l'aide du critère de *Llewellyn*. Il stipule que les conditions énoncées ici pour la représentation hybride doivent être simultanément satisfaites :

- H est stable.
- H_{11} et H_{22} sont réels positifs, c'est-à-dire que le manipulateur maître et esclave sont passifs.
- L'inégalité suivante, traduisant le couplage entre manipulateurs, est vérifiée :

$$\eta_h(j\omega) = [- (\text{Re}(H_{12} H_{21}) / |H_{12} H_{21}|) + 2 * (\text{Re}(H_{11} H_{22}) / |H_{12} H_{21}|)] \geq 1, \quad \forall \omega \geq 0 \quad (\text{I-9})$$

On note $H_{ij} = H_{ij}(j\omega)$ dans la formule précédente pour alléger les écritures. Le scalaire $\eta_h(j\omega)$ est appelé paramètre de stabilité du système de téléopération. Si l'une des conditions précédente n'est pas satisfaites, le système est potentiellement instable, il peut alors exister une paire opérateur- environnement passive que rend le système instable sans pour autant que l'instabilité soit garantie. Théoriquement, il est possible de réduire le conservatisme des approches précédentes en utilisant un modèle complet du système, incluant opérateur et

environnement. Le système ainsi modélisé possède deux entrées exogènes et les outils classiques de l'automatique s'appliquent. Néanmoins compte tenu des incertitudes sur les modèles, c'est alors bien évidemment la qualité de la modélisation et la robustesse de la commande du système téléopération maître esclave qui va primer [13].

I-5 La transparence

La transparence, notion propre à la téléopération, correspond d'une part à l'égalité entre les efforts appliqués par l'esclave et ceux perçus par l'utilisateur, et d'autre part à l'égalité entre les vitesses des deux robots (maître et l'esclave). En d'autres termes, la transparence idéale est atteinte lorsque l'opérateur perçoit les mêmes sensations que s'il manipulait directement l'environnement. Dans ces conditions, il ne perçoit notamment plus la présence des robots utilisés pour la manipulation.

Pour tenir compte à la fois des efforts et des vitesses, on peut caractériser la transparence par l'égalité entre l'impédance perçue par l'opérateur lorsqu'il manipule l'interface maître et celle de l'environnement [14]. Si l'on définit les impédances transmises côté maître et l'esclave, respectivement :

$$Z_{th} = F_h / V_h \quad \left| \quad F_e^* = 0 \right. \quad (I-10)$$

$$Z_{te} = - F_e / V_e \quad \left| \quad F_h^* = 0 \right. \quad (I-11)$$

Alors, la transparence parfait peut être traduite par deux conditions de correspondance d'impédance $Z_{th} = Z_e$ et $Z_{te} = Z_h$, que l'on peut reformuler comme suit

$$Z_{th} = (H_{11} + \Gamma_H Z_e) (1 + H_{22} Z_e)^{-1} = Z_e \quad (I-12)$$

$$Z_{te} = (H_{11} + Z_h) (\Gamma_H + H_{22} Z_h)^{-1} = Z_h \quad (I-13)$$

Avec:

$$\Gamma_H = H_{11} H_{22} - H_{12} H_{21} \quad (I-14)$$

La transparence idéale est obtenue si :

$$\left. \begin{array}{l} H_{11} = 0, H_{22} = 0 \end{array} \right\} \quad (I-15)$$

$$H_{12}H_{21} = -1$$

D'après ces conditions ; la transparence requiert donc : H_{11} aussi proche de zéro que possible, ce que revient à réduire les perturbations induites par les efforts dynamiques des manipulateurs. H_{22} aussi proche de zéro que possible, ce que revient à réduire l'influence de l'environnement sur le système de téléopération. H_{12} et H_{21} aussi proche que possible du facteur de démultiplication entre maître et esclave, et nécessairement dans des rapports inverses l'un de l'autre. On peut remarquer que la vérification des conditions de transparence précédente implique $\eta_h = 1$. Le système n'est alors que marginalement stable, d'après le critère de Llewellyn, ce qui confirme que les objectifs de stabilité et de transparence définis précédemment sont antagonistes. La transparence atteignable en pratique résulte donc d'un arrangement.

I-6 Architecture de la téléopération

I-6-1 Le principe

Le schéma de téléopération à quatre canaux proposé par Lawrence est certainement la plus connue par la communauté scientifique [16]. Il permet de généraliser l'architecture de commande d'un système de téléopération. La forme originale (figure I-3) à été modifiée par l'ajout de boucles en forces [17], selon la figure (I-4).

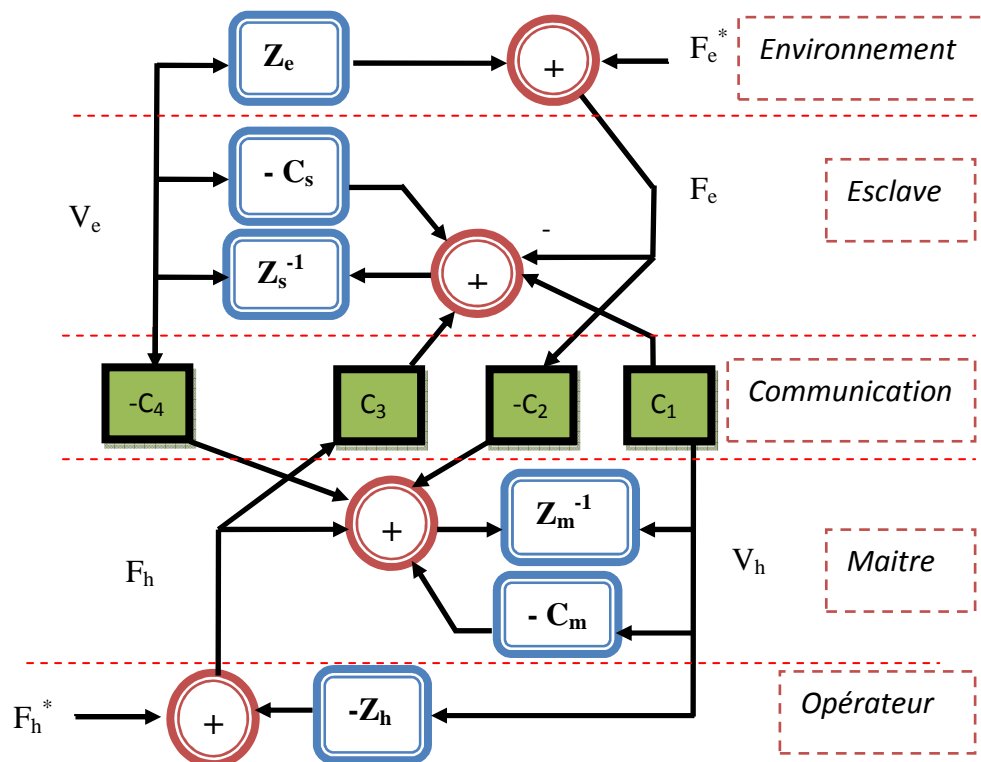


Figure I-3: Structure originale de téléopération à quatre canaux.

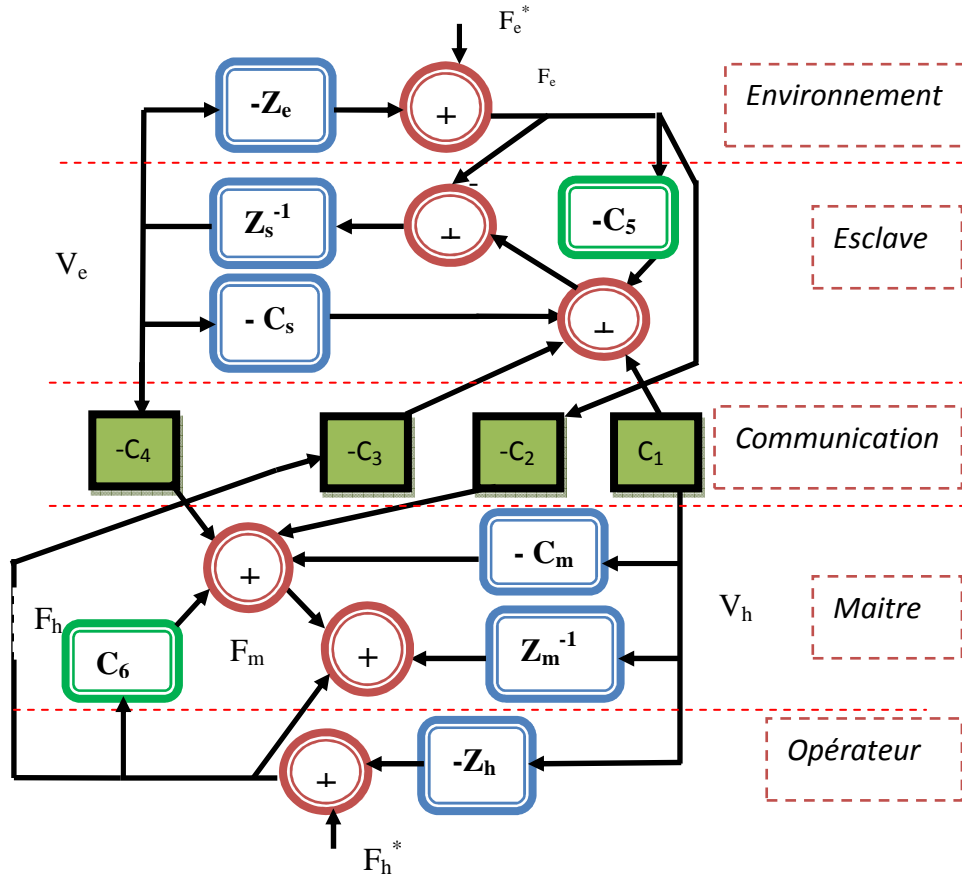


Figure I-4 : Structure quatre canaux modifiée.

La description des paramètres est la suivante :

Z_s : impédance du bras esclave

Z_m : impédance du bras maître

C_s : contrôleur côté esclave C_s

C_m : contrôleur côté maître C_m

C_i ($i = 1.. 4$) : canaux de communication.

C_5, C_6 : les correcteurs (boucle en force) respectivement coté maître et coté esclave.

Z_h : est l'impédance de la main de l'opérateur humain (indépendante de l'architecture de contrôle).

\mathbf{Z}_e : est l'impédance de l'environnement éloigné (indépendante de l'architecture de contrôle).

\mathbf{F}_h^* : est la force que développe l'opérateur, elle modélise la force volontairement créée par la main de l'opérateur.

\mathbf{F}_e^* : est une force de perturbation provenant de l'environnement.

\mathbf{V}_h : vitesse de la main de l'opérateur.

\mathbf{V}_e : vitesse de l'esclave.

\mathbf{F}_h : force totale exercée par l'opérateur sur le bras maître.

\mathbf{F}_e : est la force qu'exerce l'environnement sur le bras esclave.

Les modèles des manipulateurs maître et esclave sont donnés par les impédances notées Z_m et Z_s . l'interface étant toujours tenue, la vitesse de la main de l'opérateur est aussi la vitesse du manipulateur maître, soit $V_h = V_m$. De même, tant qu'il y a contact entre le manipulateur esclave et l'environnement $V_s = V_e$. Les quatre canaux de communication (C_1 , C_2 , C_3 et C_4) servent à commander le système de téléopération à partir des positions et des efforts mesurés de chaque côté. Ils constituent le réseau de communication dans le quel on ajoutera le cas échéant les retards purs induits par la transmission.

Les manipulateurs maître et l'esclave disposent par ailleurs de leurs propres boucles de commande locale. L'asservissement local de la vitesse est assuré par des correcteurs C_m et C_s et l'asservissement en effort par des correcteurs C_5 et C_6 . Dans la structure quatre canaux sont donc asservis simultanément positions et efforts, ce qui n'est possible que si l'une des boucles est prédominante sur l'autre. Cette est intéressante car elle permet théoriquement d'atteindre la transparence parfaite [28]. En tenant compte des boucles locales, il vient :

$$\mathbf{F}_m = C_6 \mathbf{F}_h - C_2 \mathbf{F}_e - C_m \mathbf{V}_h - C_4 \mathbf{V}_e \quad (\text{I-16})$$

$$\mathbf{F}_s = C_3 \mathbf{F}_h - C_5 \mathbf{F}_e + C_1 \mathbf{V}_h - C_s \mathbf{V}_s \quad (\text{I-17})$$

Si l'on élimine $F_m = Z_m V_h - F_h$ et $F_s = Z_s V_e + F_e$, on peut calculer la matrice hybride de la structure quatre canaux :

$$H_{11} = (Z_{cm} Z_{cs} + C_1 C_4) / ((1 + C_6) Z_{cs} - C_3 C_4) \quad (I-18)$$

$$H_{12} = (C_2 Z_{cs} - C_4 (1+C_5)) / ((1 + C_6) Z_{cs} - C_3 C_4) \quad (I-19)$$

$$H_{21} = (C_3 Z_{cm} - C_1 (1+C_6)) / ((1 + C_6) Z_{cs} - C_3 C_4) \quad (I-20)$$

$$H_{22} = ((1+C_5) (1+C_6) - C_2 C_3) / ((1 + C_6) Z_{cs} - C_3 C_4) \quad (I-21)$$

Avec $Z_{cm} = C_m + Z_m$ et $Z_{cs} = C_s + Z_s$, les conditions de transparence parfaite (I-16) sont alors vérifiées si :

$$C_1 = Z_{cs} \quad (I-22)$$

$$C_2 = 1 + C_6 \quad (I-23)$$

$$C_3 = 1 + C_5 \quad (I-24)$$

$$C_4 = -Z_{cm} \quad (I-25)$$

En pratique les conditions (I-22) et (I-25) sont souvent restreinte à :

$$\left. \begin{array}{l} C_1 = C_s \\ C_4 = -C_m \end{array} \right\} \quad (I-26)$$

Ce qui signifie que la commande ne compense pas la dynamique des manipulateurs maître et esclave.

La stabilité de la structure à quatre canaux à été étudiée par Lawrence à partir du critère de passivité, qui conduit à un jeu de conditions [16]. Ces conditions complexes sont surtout utiles pour vérifier à posteriori que les correcteurs choisis à l'aide des conditions de transparences sont stables. Néanmoins, comme on le montre précédemment, le paramètre de stabilité reste alors tel que $\eta_h(w)=1$, $\forall w \geq 0$ ce qui traduit la faible robustesse en stabilité du réglage correspondant aux conditions parfaites de transparence.

I-6 Structure position-position

La structure est la première commande bilatérale qui fut utilisée en téléopération. Elle utilise uniquement les mesures de position du manipulateur maître et esclave, ce qui économise donc l'usage d'un capteur d'effort. L'erreur entre les deux positions est utilisé, coté maître pour assurer le retour d'effort et de coté esclave pour reproduire les mouvements de l'opérateur.

Le schéma de téléopération position-position ce déduit du schéma quatre canaux (figure I-5) $C_2=C_3=C_5=C_6=0$.

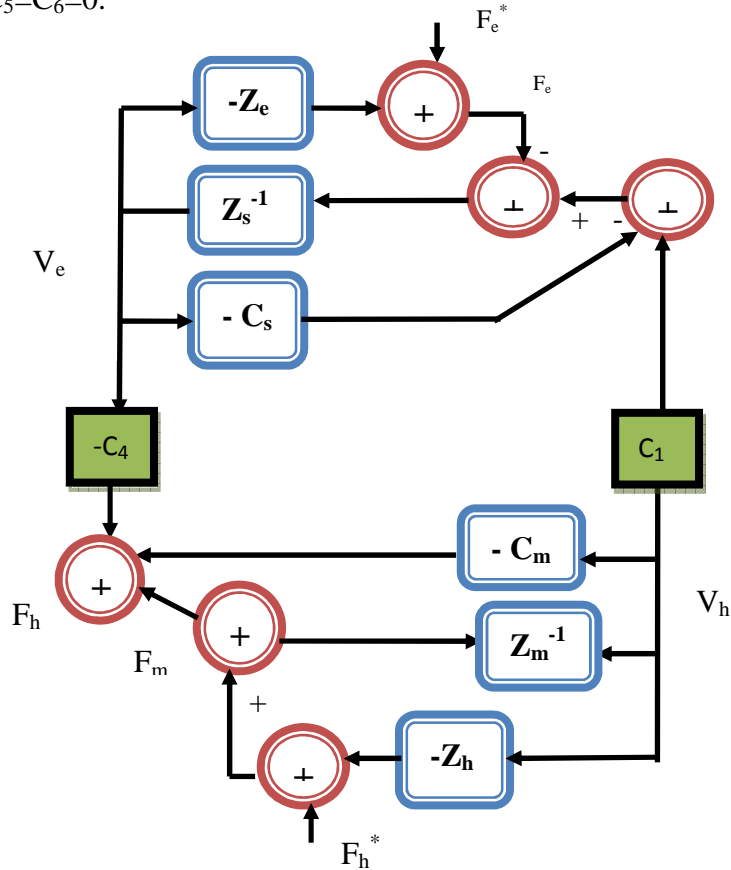


Figure I-5 : Structure position-position.

Les paramètres de la matrice hybride peuvent être calculés à partir des équations (I-19) et (I-22) :

$$H_{11} = (Z_{cm} Z_{cs} + C_1 C_4) / Z_{cs} \tag{I-27}$$

$$H_{12} = - C_4 / Z_{cs} \tag{I-28}$$

$$H_{21} = - C_1 / Z_{cs} \tag{I-29}$$

$$H_{22} = 1 / Z_{cs} \tag{I-30}$$

On peut remarquer que la transparence idéale ne peut être atteinte. L'annulation des canaux C_2 et C_3 n'annule pas H_{22} , mais dépend de l'impédance et du gain correcteur locale de l'esclave. La transparence est d'autant meilleure que ces facteurs sont grands. En toute rigueur, l'application des conditions de transparence parfaite assure uniquement la condition $H_{11} = 0$. On peut tout de même utiliser les règles applicables qui assurent les conditions (I-22) et (I-25). Alors on montre d'après (I-9) que la stabilité inconditionnelle en mode couplé est traduite par la condition :

$$[\operatorname{Re}(Z_{cm}/Z_{cs}) / |Z_{cm}/Z_{cs}|] \geq 1, \forall \omega \geq 0 \quad (\text{I-31})$$

Qui n'est vérifiée que si le rapport de Z_{cm} à Z_{cs} est réel. Un modèle linéaire de ces deux termes peut être calculé en notant :

$$Z_{cm} = m_m s + b_m + (k_m/s) \quad (\text{I-32})$$

$$Z_{cs} = m_s s + b_s + (k_s/s) \quad (\text{I-33})$$

Avec m_m et m_s respectivement les masses des manipulateurs maître et esclave, b_m et b_s résultant de la viscosité des manipulateurs et des termes proportionnels des correcteurs et k_m et k_s résultant du terme intégral des correcteurs. Alors, il faut que :

$$(k_s / k_m) = (m_s / m_m) = (b_s / b_m) \quad (\text{I-34})$$

Pour vérifier la condition (I-31) à la limite. En pratique on a donc plutôt intérêt à ne pas se contenter de réglage de C_1 et C_4 pour obtenir de meilleures propriétés de robustesse en stabilité [12].

I-7 Structure force-position

La structure force-position nécessite la mesure de l'effort d'interaction entre l'esclave et l'environnement [20]. Elle est obtenue de schéma de téléopération à quatre canaux (figure I-4), en choisissant $C_3 = C_4 = C_5 = C_m = 0$ (figure I-6). Il ne s'agit pas tout à fait de la structure originale, qui est telle $C_6 = 0$, car on a intérêt à conserver la boucle locale d'effort côté maître si possible. Les paramètres de la matrice hybride déduits des équations (I-18) et (I-21) :

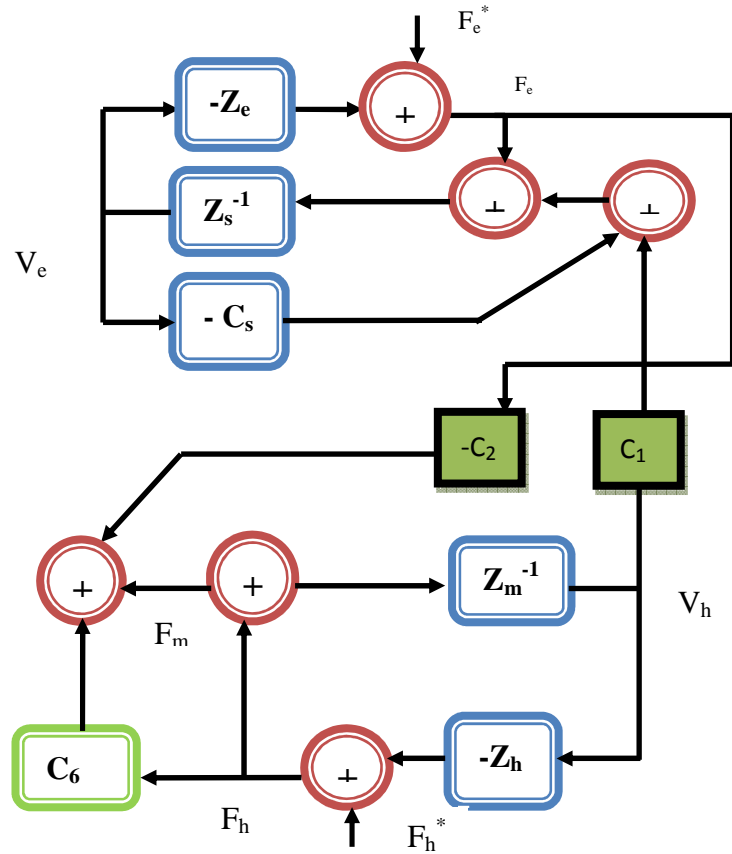


Figure I-6: Structure force-position.

$$H_{11} = Z_{cm} / (1 + C_6) \tag{I-34}$$

$$H_{12} = C_2 / (1 + C_6) \tag{I-35}$$

$$H_{21} = - C_1 / Z_{cs} \tag{I-36}$$

$$H_{22} = 1 / Z_{cs} \tag{I-37}$$

De ces conditions, on remarque que toutes les conditions de la transparence parfaite ne peuvent pas être respectées simultanément. de nouveau, on peut cependant adopter les règles applicables, qui déterminent les correcteurs $C_1 = Z_{cs}$ et $C_2 = 1 + C_6$. Alors, on peut montrer d'après (I-9) que la stabilité inconditionnelle en mode couplé est traduite par la condition :

$$\operatorname{Re}(Z_{cm} / (1 + C_6)) \operatorname{Re}(1/Z_{cs}) \geq 0, \quad \mathbf{vw} \geq \mathbf{0} \quad (\text{I-38})$$

Qui peut être vérifiée si les manipulateurs possèdent de l'amortissement. En présence de retard, cette condition devient [17] :

$$\operatorname{Re}(Z_{cm} / (1 + C_6)) \operatorname{Re}(1/Z_{cs}) \geq 1, \quad \mathbf{vw} \geq \mathbf{0} \quad (\text{I-39})$$

Qui n'est en revanche pas vraie sur toute la bande de fréquence pour des impédances linéaires définies par les équations (I-32) et (I-33), en raison de la forme de l'impédance de l'esclave.

I-8 Le retard de transmission et la stabilité

Le problème des retards de transmission a été soulevé par *W.R.Ferrell* en 1965 à la NASA. Dont, il a mis à l'évidence l'apparition d'instabilité dans les systèmes à retour d'effort.

Dans ce qui suit, nous présentons l'influence des retards de transmission sur les deux types vu précédemment de système de téléopération restituant les efforts (la structure position-position et la structure force-position)

I-8-1 L'influence des retards sur les systèmes à retour d'effort.

- **Structure position-position**

L'influence du retard de transmission dans le cas de structure position-position, ce traduit principalement par la génération d'un frottement visqueux très important [21].

Un effet qui ne peut être éliminé que par la diminution des gains des asservissements de position [21, 22].

- **Structure force-position**

L'influence des retards de transmission dans le cas de structure force-position ne pose pas de problème dans le cas où le robot esclave est libre ($F_e = 0$) : la force retournée à l'opérateur est nulle. Dans le cas contraire ($f_e \neq 0$), les contacts poseront de sérieux problèmes de stabilité, qui se manifeste sous forme de déphasage entre les deux allures des deux robots [25].

I-9 La modélisation de système

Le système modélisé est à trois degré de liberté, nous appelons le système total comprenant le bras maître, le bras esclave, et leurs arrangements de commande en tant que système maître-esclave.

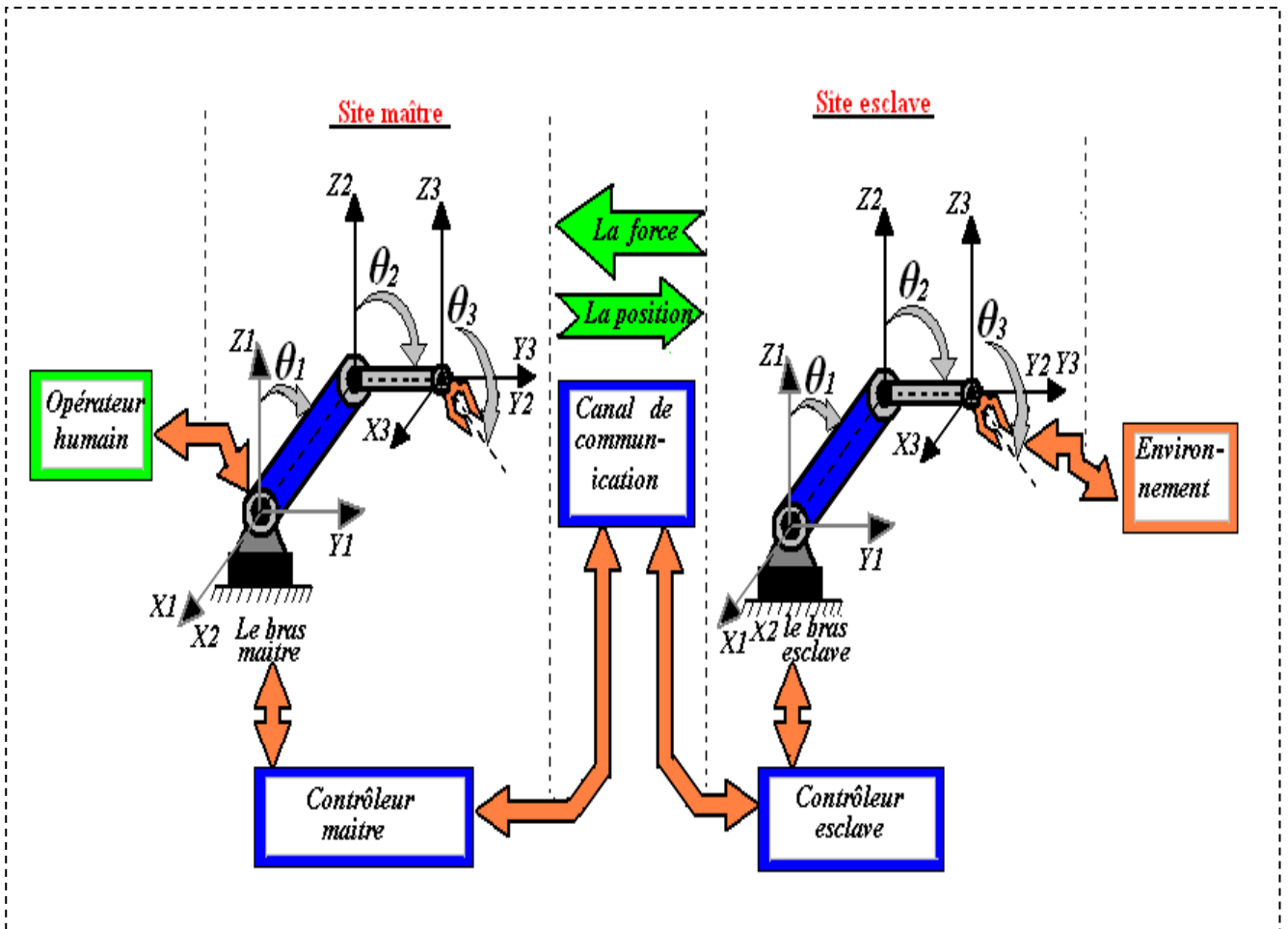


Figure I-7 : Le système de téléopération global.

Le bras maître et le bras esclave sont identiques, ce qui implique que leurs impédances sont égales. Les impédances des différents corps du bras maître et du bras esclave sont données par la relation suivante:

$$\frac{X(s)}{F(s)} = Z_m^{-1} = \frac{s}{\frac{ml^2}{3}s^2 + g \frac{ml}{2}}$$

(I-40)

Où s dénote l'opérateur de Laplace.

Les caractéristiques dynamiques des bras maître et esclave, de l'opérateur et de l'environnement sont représentées respectivement par les impédances Z_m , Z_s , Z_h et Z_e .

I-10 La téléopération sans temps de retard

Le comportement désiré pour le bloc de communication est donné par les équations :

$$F_m = F_e \quad (I-41)$$

$$V_s = V_m \quad (I-42)$$

Dans le cas de l'absence de temps de retard.

Où :

F_m : la force de retour désiré de l'esclave vers le maître.

F_e : la force de l'environnement.

V_s : la vitesse désirée de l'esclave.

V_m : la vitesse du maître.

Le système est passif puisque le temps de retard sera nul, et transparent à cause de la similitude entre le bras maître et le bras esclave.

Le système devient comme le montre dans la figure ci dessous :

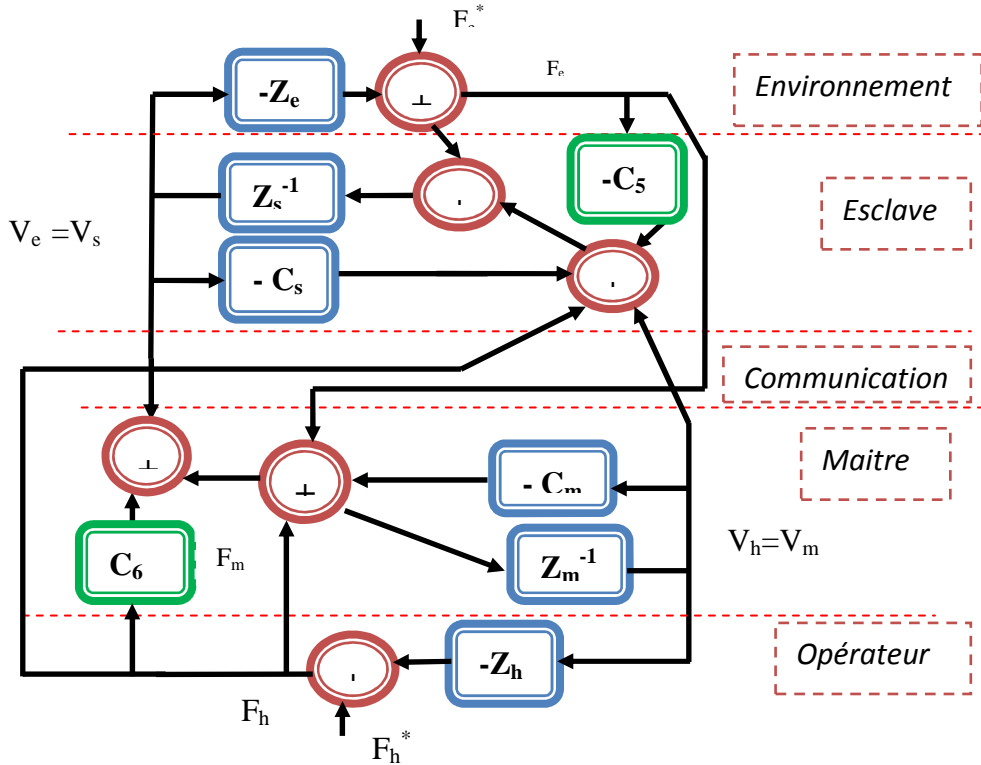


Figure I-8 : Système maître-esclave avec retour d'effort sans retard de temps de communication (Système Désiré).

I-11 La transparence du système

- **L'impédance de l'opérateur humain**

L'impédance de transparence Z_{th} est donnée par la formule (I-11).

La différence entre l'impédance Z_{th} et l'impédance Z_e est interprétée comme mesure de transparence. Dans le cas de système sans temps de retard, la transparence est achevée si :

$$Z_t = Z_e + Z_m, \quad \forall Z_e \tag{I-43}$$

- **L'impédance de l'environnement**

Le bras manipulateur de l'esclave interagit avec un environnement aléatoire, il peut trouver un obstacle soft, hard ou se déplace librement dans l'environnement, caractérisé par la valeur de la force d'environnement en la comparant à celle de l'esclave, dont on aura respectivement $F_e < F_s$, $F_e > F_s$ et $F_e = 0$.

L'impédance de point final du système est l'impédance vue par le côté de l'esclave. Cette impédance peut être donnée par la formule suivante :

$$Z_{te} = - F_e / V_e = Z_h \quad (I-44)$$

Il est intéressant de noter que cette impédance désirée doit être égale à celle de la main humaine.

Dans la commande robotique par impédance, le but est de créer une impédance désirée à l'extrémité d'un bras manipulateur ; mais en pratique cette impédance désirée n'est pas souvent la meilleure pour la tâche de ce manipulateur. L'expérience a montré que la main humaine offre des impédances ajustables, idéales lors des tâches de manipulations des différents objets et ceci sans problèmes de stabilité [26].

I-12 Stabilisation d'un système de téléopération avec retour d'effort

Parmi les techniques de stabilisation des systèmes de téléopération les plus utilisées en citent la méthode de prédiction. Cette méthode se repose sur la prédiction du comportement du robot esclave en interaction avec son environnement.

- **Prédicateur de Smith :**

Le Prédicateur de Smith est un outil de régulation pour les systèmes asymptotiquement stables en boucle ouverte retardés mono-variables [27]. Des généralisations aux cas multi-variables et pour les systèmes instables sont possibles mais alors il n'est plus possible de réaliser le bouclage avec un transfert rationnel. On utilise alors des bouclages à retard répartis faisant apparaître des fractions rationnelles en s et $e^{-\Delta x}$ nous ne présentons ici que la version historique publiée par Smith.

Dans ce contexte ; un retard sur l'entrée ou la sortie est équivalent. En effet les formes, d'état suivant possèdent la même fonction de transfert :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \Delta) \\ Y(t) = Cx(t) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ Y(t) = Cx(t - \Delta) \end{cases}$$

Où: $x \in R^n, u \in R$ et $Y \in R^n$. Cette fonction de transfert est un produit d'une fonction rationnelle propre et d'un opérateur à retard :

$$G(s) \equiv G_0(s)e^{-\Delta s} = C(sI - A)^{-1}Be^{-\Delta s}$$

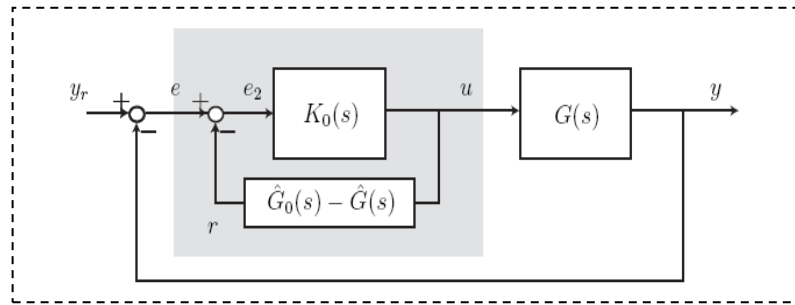


Figure I-9 : Le prédicateur de Smith (zone grisée).

K_0 conçu pour le système sans retard $G_0(s)$ en l'insérant dans le schéma général de la Figure (I-9) Les blocs additionnels \hat{G}_0 et $\hat{G}(s)$ représentent la connaissance du système. Idéalement, on a $\hat{G}_0 = G_0$ et $\hat{G} = G$. On suppose donc le transfert G_0 stable.

C'est sous cette hypothèse qu'on comprend le fonctionnement du prédicateur de Smith. Grâce à la boucle interne au prédicateur (dans la zone grisée de la Figure (I-9)), le signal entrant dans le contrôleur K_0 est

$$e_2 = y_r - G(s)u - (G_0(s) - G(s))u = y_r - G_0(s)u$$

Ce terme est la différence entre la référence et la prédiction de la valeur de sortie du système à l'horizon Δ .

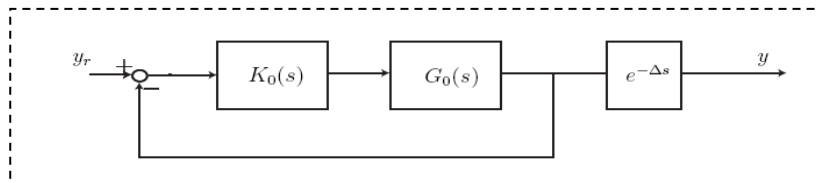


Figure I-10 : Forme équivalente du système boucle avec prédicateur de Smith.

Le comportement entrée-sortie du système bouclé par le prédicateur de Smith est équivalent à celui du système donné sur la Figure (I-10). Artificiellement, on a réussi à intercepter le signal de mesure avant le bloc retard et donc à nous ramener à un problème de régulation d'un système sans retard. On notera toutefois que le retard est toujours présent sur la sortie. Il n'a pas disparu du problème mais il n'interfère pas avec la régulation [28].

En pratique, le prédicateur de Smith souffre d'un manque de robustesse par rapport à une incertitude sur le retard, alors que la robustesse par rapport aux paramètres est moins problématique. Dans ce cas, \hat{G} et G sont différents, de même que \hat{G}_0 et G_0 . Il ne suffit pas toujours de calculer un contrôleur K_0 procurant de bonnes marges de stabilité au système G_0 bouclé. Certaines conditions suffisantes de robustesse sont exposées dans [27] ; elles portent sur le choix du contrôleur K_0 mais sont difficiles à mettre en œuvre. Il est indispensable de l'utiliser dans la configuration proposée sur la Figure (I-11). On a rajouté dans la boucle externe un filtre "de robustesse" qu'on peut ajuster pour dégrader les performances mais assurer une stabilité en boucle fermée en dépit d'une incertitude sur le retard. Lorsque ce filtre $F(s)$ vaut 1 on retrouve le prédicateur de Smith des Figures (I-9) et (I-10).

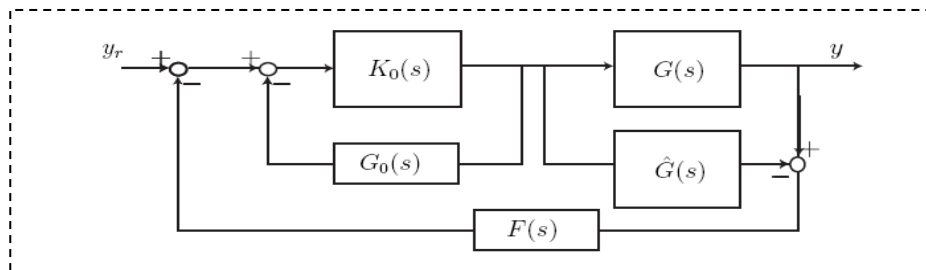


Figure I-11 : Implémentation du prédicateur de Smith avec filtre additionnel de robustesse.

I-13 Elimination de déphasage

Le retard pur amène a un déphasage, qui se traduit forcément par une instabilité [25]. Pour que le système soit le plus transparent possible à l'opérateur, on a procédé par l'ajout d'une boucle d'asservissement dans le canal de communication. Le principe de celui-ci est d'introduire un décalage entre l'entrée et la sortie de chaque ligne de transmission (dans notre cas 0.003 sec), puis ajuster les différents gains du régulateur PID de façon à compenser le retard (élimination du décalage)

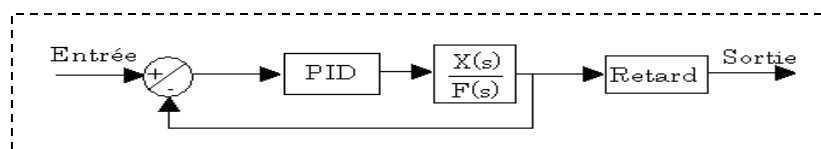
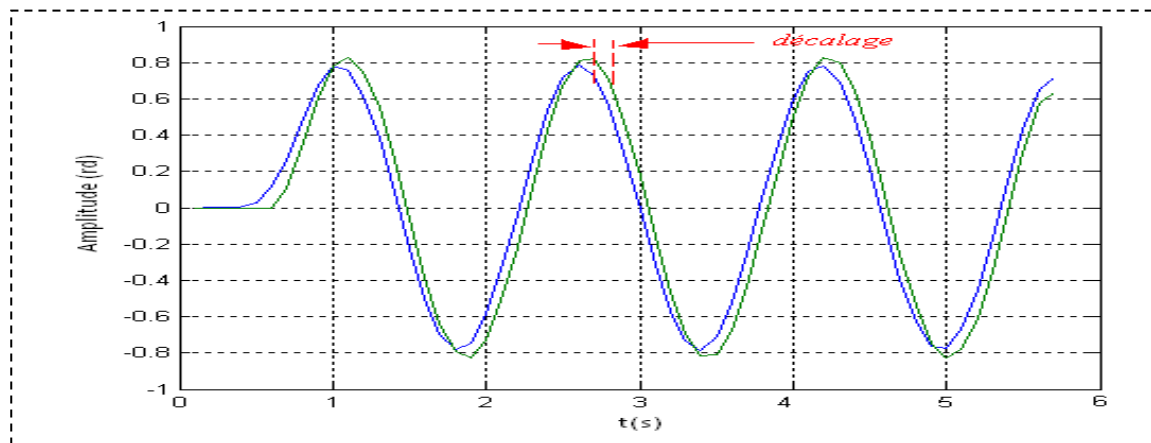
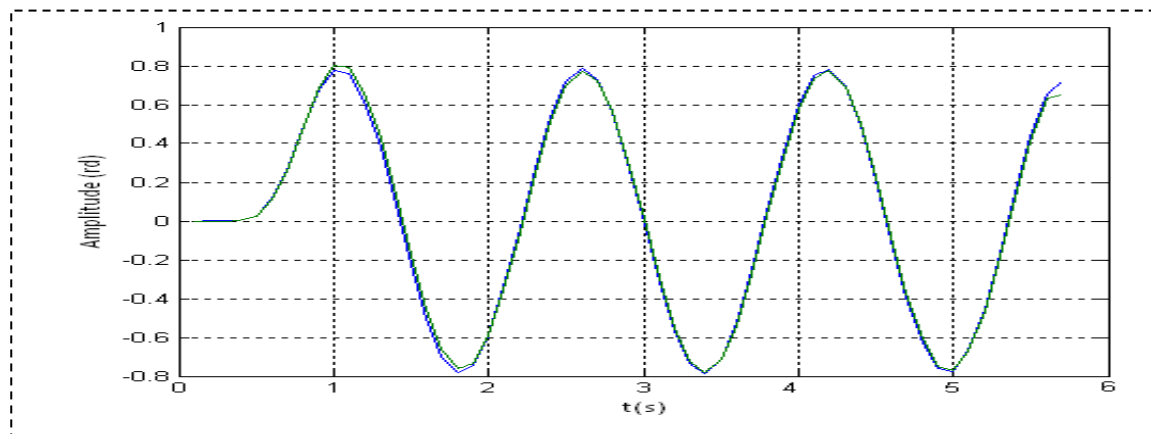


Figure I-12 : Boucle de compensation de retard

Avec : La fonction de transfert $\frac{X(s)}{F(s)}$, représente l'impédance Les impédances des différents corps du bras maître.

Les figures I-13 et I-14 montre respectivement l'influence du retard de transmission et le rôle de la boucle de compensation de retard.

**Figure I-13 : L'influence du retard de transmission.****Figure I-14 : L'influence de la boucle de compensation de retard.**

I-14 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié un système de téléopération permettant la réalisation d'une tâche à distance tout en assurant la transparence et la stabilité du système. La première

partie de ce chapitre a été consacrée à la description des systèmes de téléopération avec retour d'effort, leurs architectures et les problèmes liés au retard de transmission. La seconde partie a fait l'objet de la modalisation du système choisi et la solution au problème d'instabilité causé par le retard de transmission.

CHAPITRE II

Diagnostic des défauts et commande tolérante aux défauts

II-1 Introduction

La surveillance n'est qu'un module d'un processus complet permettant à une installation de fonctionner en respectant des critères de sécurité, de productivité et de qualité même en présence de défaillance. La commande du système peut être conçue de manière à utiliser les informations fournies par le module de surveillance. On parle alors de « commande tolérante aux défaillances ».

Dans ce chapitre, nous présentons la méthode diagnostic à base de modèle en vue d'atteindre la commande tolérante aux défauts (FTC).

II-1-1 Définition

Un diagnostic est un état expliqué d'un système physique compatible avec les informations disponibles sur le comportement réel du système et avec le modèle de comportement de référence disponible. Couramment, le diagnostic est exprimé par les états des composants [37] ou l'état des relations de description du comportement [38].

II-2 Type de 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 [31].

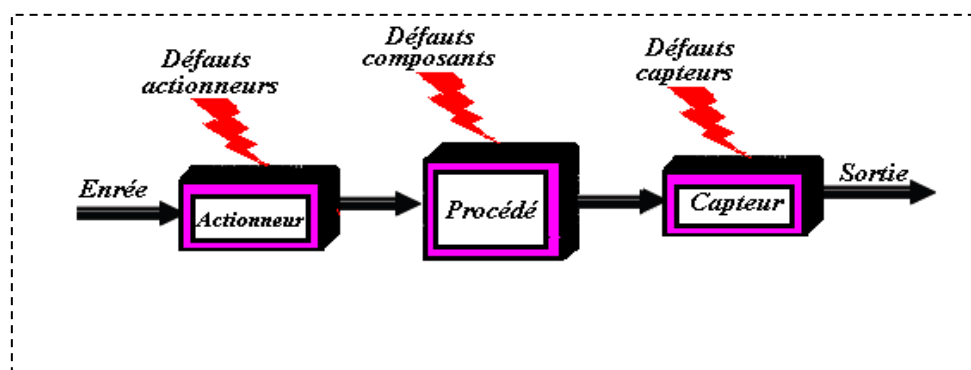


Figure II.1 - Types de défauts

II-2-1 Défauts actionneurs

Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative et détériorent ainsi le signal d'entrée du système. Ils représentent une perte totale ou partielle d'un actionneur agissant sur le système. Par exemple dans le cas d'une perte totale, lorsque un actionneur est resté "coller" sur une position entraînant une incapacité à commander le système par le biais de cet actionneur. Les défauts actionneurs partiels sont des actionneurs réagissent de manière similaire au régime nominal mais en partie seulement, c'est-à-dire avec une certaine dégradation dans leurs action sur le système.

II-2-2 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.

II-2-3 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.

Comme aussi, les défauts peuvent être classés relativement à leurs effets sur les performances du système, dont deux classes de défauts peuvent être distingués : des défauts additifs et des défauts multiplicatifs:

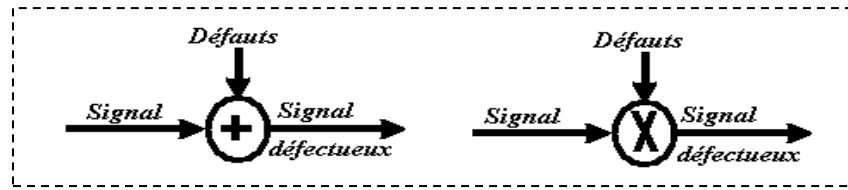


Figure II.2 - Classification des défauts : additifs et multiplicatifs

II-3 Modélisation des défauts

La représentation d'état du système dans les conditions nominales est la suivante,

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

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

- ❖ Les défauts actionneurs et les défauts capteurs sont modélisés comme des signaux additifs respectivement aux signaux d'entrée et aux signaux de sorties.
- ❖ Les défauts systèmes sont modélisés comme une dynamique additionnelle avec une matrice de distribution.

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

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Hd_s(t) + B(u(t) + Q_a d_a(t)) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + Q_c d_c(t) \\ d_s(t) \in \mathbb{R}^{n \times 1}, \quad d_a(t) \in \mathbb{R}^{m \times 1} \text{ et } d_c(t) \in \mathbb{R}^{p \times 1} \end{cases} \quad (II-2)$$

Où $d_s(t)$, $d_a(t)$ et $d_c(t)$ représentent respectivement les défauts composants, les défauts actionneurs et les défauts des capteurs. La matrices H , Q_c et Q_a sont respectivement des matrices de distribution de $d_s(t)$, action des défauts capteurs et des défauts actionneurs.

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, il est possible de réécrire les équations de l'expression (II-2) sous la forme suivante :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Hd_1s(t) + B(u(t) + Q_1a d_1a(t) + Ef_1p(t)) \quad @y(t) = Cx(t) + Du(t) \tag{II-3}$$

Avec $f_p(t)$ et $f_b(t)$ représentent respectivement les perturbations et les bruits agissant sur le système. La matrice E, est dite matrice de distribution de $f_p(t)$.

II-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 (II-3), [39].

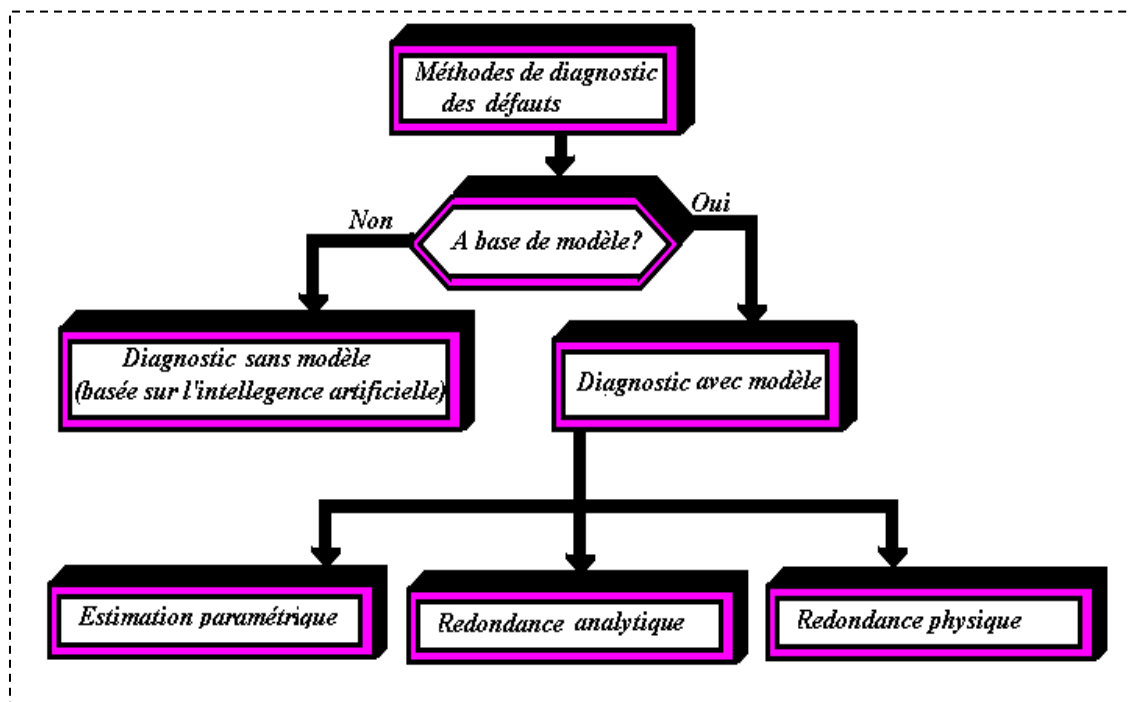


Figure II.3 : Méthodes de diagnostic

II-4-1 Méthodes de diagnostic sans modèle mathématique

Au sens strict, ces méthodes supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine confortée par un solide retour d'expérience. Dans cette catégorie, on retrouve les méthodes basées sur les tests statistiques et celles basées sur l'intelligence artificielle

II-4-2 Méthodes de diagnostic avec modèle mathématique

Le diagnostic à base de modèles est largement présent dans la littérature et a été développé dès les années soixante-dix. On peut citer par exemple sur le plan méthodologique Isermann [29,30], Willsky [40], Clark et al. [41], Frank [42], Gertler [43].

Cette approche est connue sous le nom de *FDI* (Fault Detection and Isolation), qui, fait intervenir les techniques de génération de résidus, de détection et de localisation. Cette approche est schématisée sur la figure (II-1) :

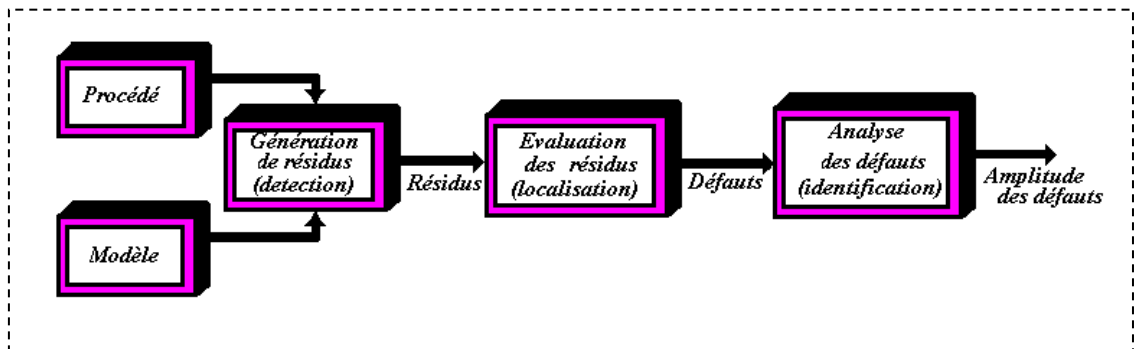


Figure II-4 : Procédure de détection et d'isolation des défauts.

La première démarche dans la mise en œuvre d'un système de diagnostic à base de modèle consiste à générer des indicateurs de défauts. Ils contiennent des informations sur les anomalies ou dysfonctionnements du système à surveiller. Le principe est de mesurer l'écart entre les mesures des signaux du procédé, capteurs ou actionneurs, et la valeur théorique fournie par le modèle dans des conditions de fonctionnement nominal.

La qualité de la génération de résidus est un élément essentiel pour garantir les performances d'un système de diagnostic. En effet, de la structure (composition et précision) du système de résidus engendré dépendra la robustesse de la détection et de la localisation.

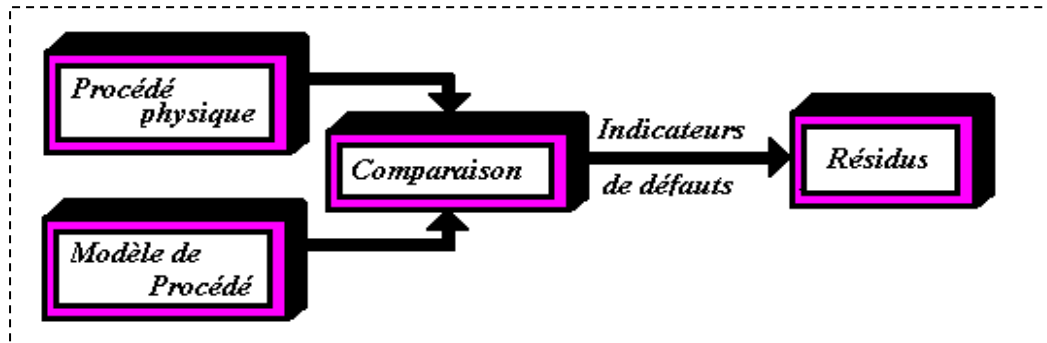


Figure II-5 : La génération de résidus

Frank [Frank 98] a distingué trois approches pour la génération de résidus:

- Redondance physique et analytique.
- Les approches par l'estimation des paramètres.

II-4-2-1 Redondance physique et analytique

a) Redondance physique

Le moyen le plus direct pour obtenir une information fiable sur une même variable est de disposer de plusieurs capteurs la mesurant simultanément. Une redondance à trois permet notamment d'isoler un capteur défaillant. Ce qui montre l'avantage de la méthode par la redondance physique, dont est conceptuellement simple, mais cette méthode souffre des désavantages qui limitent son application :

1. Doubler ou tripler le nombre de capteur revient à augmenter considérablement son coût et à affronter des problèmes d'encombrement liées à l'installation et à la maintenance de ces capteurs. Elle est par conséquent, utilisée uniquement pour la surveillance des sous-ensembles critiques d'un système.
2. Les composants identiques fabriqués dans la même série peuvent se dégrader de la même façon et tomber en panne en même temps.

b) Redondance analytique

Cette redondance fait appel à des modèles analytiques représentatifs des relations de causalité et aux autres contraintes existantes entre les signaux présents dans le système. Les mesures obtenues des différents capteurs occultent le système peuvent alors être reliées par ces modèles.

Les modèles analytiques étant une représentation mathématique des lois d'évolution des variables physiques du système y est décrite par un ensemble d'équations issues des lois de la physique. Le procédé ainsi modélisés ne suit par souvent une telle représentation idéale, ceci est dû à la présence d'incertitude sur les paramètres du modèle, des modifications structurelles du système, des non-linéarités et finalement l'effet des perturbations et des bruits de mesure.

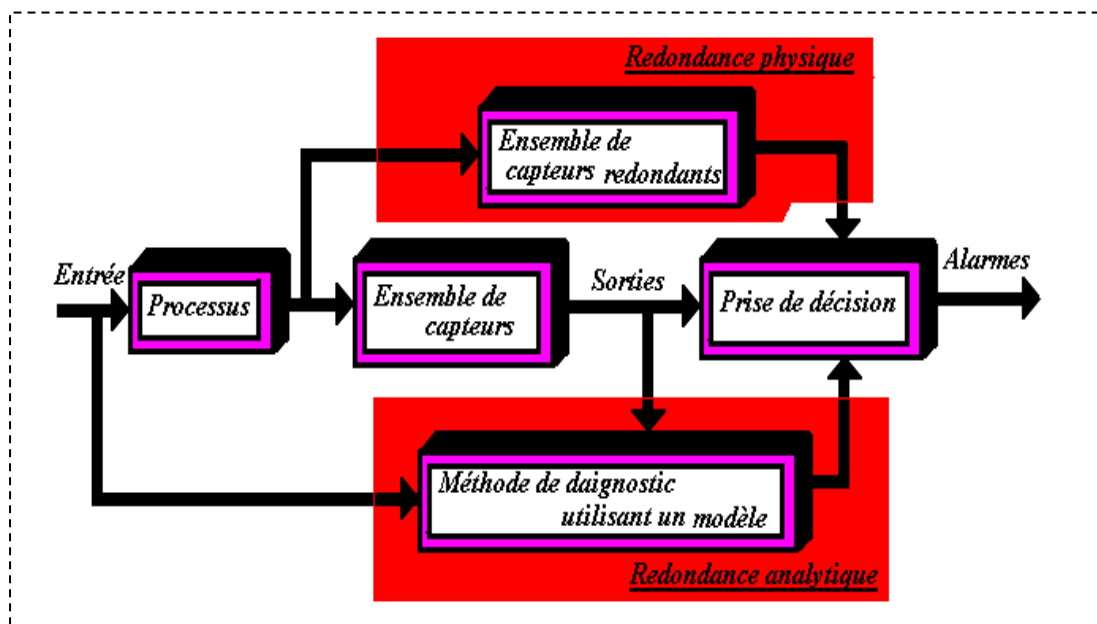


Figure II-6 : Architecture de redondance physique et analytique

II-4-2-2 Les approches par l'estimation des paramètres

Le principe des méthodes d'estimation paramétrique se repose sur l'identification des paramètres caractérisant le mode sain (en absence de pannes) de fonctionnement, à partir de mesures des entrées et des sorties du système [29]. Ainsi, on dispose d'une estimation des

paramètres du modèle, effectuée à partir des mesures prises sur le système et de leurs valeurs théoriques. La détection de l'apparition de défaillances dans le système, s'effectue par une comparaison entre les paramètres estimés et les paramètres théoriques.

La méthode d'estimation paramétriques pour la surveillance, comprend cinq étapes dans la détection des défaillances [30] :

- ❖ Modélisation mathématique du système selon des équations du type :

$$Y(t) = f(U(t), \theta) \quad (\text{II-4})$$

Avec : $Y(t)$ et $U(t)$ représente respectivement les entrées et les sorties du système, et θ représente les paramètres du modèle.

- ❖ Description des relations entre les paramètres du modèle θ et les constantes physique ρ :

$$\theta = g(\rho) \quad (\text{II-5})$$

- ❖ Estimation $\hat{\theta}$ des paramètres du modèle à partir de l'équation (II-4) et des mesures des entrées et des sorties du système :

$$\hat{\theta} = h(y(1), \dots, y(t); u(1), \dots, u(t)) \quad (\text{II-6})$$

- ❖ Estimation $\hat{\rho}$ des paramètres du système à partir de la relation (II-5) :

$$\hat{\rho} = g^{-1}(\hat{\theta}(t)) \quad (\text{II-7})$$

- ❖ La détection de la présence d'une défaillance, se fait soit, par une comparaison entre les paramètres théoriques connus θ du modèle et ceux estimés lors du fonctionnement réel $\hat{\theta}$, ou en comparant les paramètres physiques ρ connus du système à ceux estimés lors du fonctionnement réel $\hat{\rho}$.

Cette détermination fait également appel à la théorie de la décision.

II-5 Principe d'un générateur de résidu

Considérons un système dynamique dont le modèle mathématique correspondant au fonctionnement nominal (sans défaillance ni perturbation) est supposé connu.

Le problème de la génération de résidus peut alors être posé de la manière suivante :

Etant donné les entrées et les sorties du système, on suppose qu'il est possible de générer un ensemble de signaux, appelés indicateurs de défauts "résidu", permettant de mettre en évidence l'apparition d'un éventuel défaut sur le processus [32].

On adopte en générale le modèle décrit par l'expression (II-2), permettant la prise en compte des diverses incertitudes et des défauts sur fonctionnement nominal du système.

II-5-1 Génération de résidus

La représentation du système (II-3) par une matrice de transfert conduit alors aux relations suivantes [32] :

$$y(s) = G_u(s)u(s) + G_d(s)d(s) + G_f(s) \quad (\text{II-8})$$

Avec :

$$\begin{cases} G_u(s) = C(SI - A)^{-1}B \\ G_d(s) = C(SI - A)^{-1}Q_c + Q_d \\ G_f(s) = C(SI - A)^{-1}E \end{cases}$$

Où « s » dénote l'opérateur Laplacien.

Le problème est dans la construction d'un dispositif, appelé générateur de résidus, permettant d'élaborer, à partir des grandeurs d'entrées et de sorties mesurées sur le système, un vecteur d'indicateurs de défauts ou vecteur des résidus, noté $r(t) \in R^q$, tel que :

$$\begin{cases} r(t) \neq 0 \text{ si } d(t) \neq 0 \\ r(t) = 0 \text{ si } d(t) = 0 \end{cases} \quad (\text{II-9})$$

Où $d(t)$ représente le vecteur des défauts détecté (défauts capteurs, actionneur et composante).

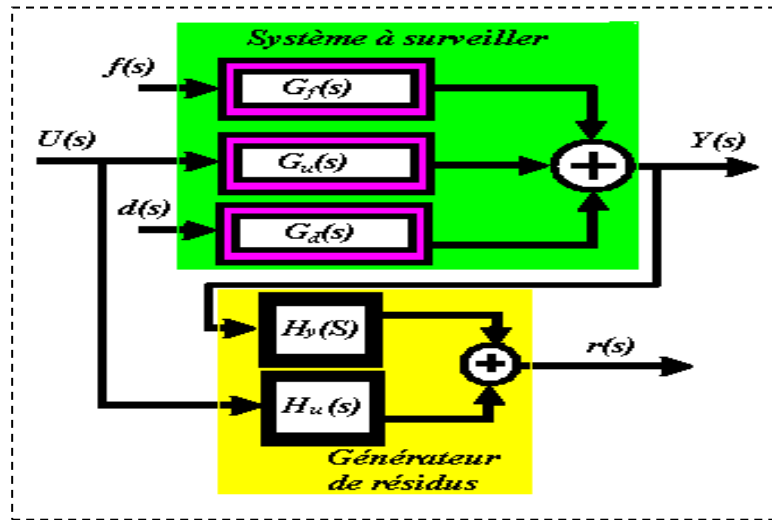


Figure II-7 : Structure générale d'un générateur de résidus

Les matrices de transfert $H_u(s)$, $H_y(s)$ supposées stables et propres doivent être telles que les conditions (II-9) soient vérifiées. L'expression générale du générateur de résidus est comme suit :

$$r(s) = H_u(s)u(s) + H_y(s)(G_u(s)u(s) + G_f(s)f(s) + G_d(s)d(s)) \tag{II-10}$$

Afin que les conditions (II-9) soient vérifiées les matrices $H_u(s)$, $H_y(s)$ doivent satisfaire :

$$\begin{cases} H_u(s) + H_y(s)G_u(s) = 0 \\ H_y(s)G_d(s) = 0, H_y(s)G_f(s) \neq 0 \end{cases} \tag{II-11}$$

Notons que, $H_y G_f$ représente la matrice de transfert entre le vecteur des défauts et le vecteur des résidus, elle permet de définir la table des signatures des défauts, qui sera exploitée pour la localisation des défauts.

La synthèse du générateur de résidus consiste en un choix correct des matrices $H_u(s)$, $H_y(s)$ telles que les conditions (II-11) soient vérifiées.

II-5-2 Détection et localisation des défauts

L'étape de détection doit permettre de décider sur l'état de fonctionnement (normal ou anormal) du système. Considérons par exemple un système soumis à trois défauts f_1, f_2 et f_3 pour lequel on dispose d'un générateur de résidus à trois composantes r_1, r_2 et r_3 . Supposant, par exemple, que la matrice de transfert $H_y G_f$ est définie par

$$r(s) = \begin{bmatrix} r_1(s) \\ r_2(s) \\ r_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & 0 & G_{13}(s) \\ 0 & G_{22}(s) & 0 \\ 0 & G_{32}(s) & G_{33}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(s) \\ f_2(s) \\ f_3(s) \end{bmatrix} \tag{II-12}$$

Avec G_{11}, G_{13}, G_{22} et G_{32} et G_{33} sont des fonctions de transfert stable et propres. D'après cette relation, lorsque l'un des défauts est non nul, le vecteur des résidus est non nul. On peut alors penser qu'il suffit de tester le non nullité des résidus pour décider de l'apparition d'un défaut.

En réalité, les grandeurs mesurées étant toujours entachées de bruit et de modèle utilisé étant imparfait, les résidus sont généralement non nuls même en absence de défaut. En considérant ces différentes sources d'incertitudes comme des entrées perturbatrices notées e_i , agissant de manière additive sur le vecteur des résidus, la relation précédente devient :

$$r(s) = \begin{bmatrix} r_1(s) \\ r_2(s) \\ r_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & 0 & G_{13}(s) \\ 0 & G_{22}(s) & 0 \\ 0 & G_{32}(s) & G_{33}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(s) \\ f_2(s) \\ f_3(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{r1}(s) \\ e_{r2}(s) \\ e_{r3}(s) \end{bmatrix} \tag{II-13}$$

Cette relation montre bien que le résidu est non nul en absence de défaut. La détection d'un défaut peut tout fois être réalisée en comparant les résidus à un certain seuil de détection δ dépendant de e_{r1}, e_{r2} et e_{r3} . Ce seuil de détection doit être tel que : $\delta > |e_{ri}(t)|$ pour $i=1, \dots, 3$. La détection de défaut se réalise de la façon suivante :

$$\begin{cases} \|r(t)\| \leq \delta \rightarrow f(t) = 0 \\ \|r(t)\| > \delta \rightarrow f(t) \neq 0 \end{cases} \tag{II-14}$$

Les résidus sont nuls jusqu'à l'instant d'apparition de défaut t_f , seul le résidu r_1 est détecté non nul. Le résultat de la comparaison à un seuil est une grandeur booléenne, on écrira

symboliquement que le résidu $r_i = 1$ si $|r(t)| > \delta$ si non $r_i = 0$. Dans ce cas, on a $r(t > t_f) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, qui représente la signature du défaut.

Lorsqu'un défaut est détecté, il s'agit de la localisation, cette localisation est réalisé à partir de la table des signatures, définie par la matrice de transfert $H_y G_f$ entre les défauts et les résidus. Dans l'exemple considéré, la table des signatures est donnée comme suit :

	f_1	f_2	f_3
r_1	1	0	1
r_2	0	1	0
r_3	0	0	1

Tab. II-1 : Table des signatures

D'après cette table, la signature $r = [1 \ 0 \ 0]^T$ est associée au défaut f_1 . D'une manière générale, la signature d'un défaut correspond à l'une des colonnes de la table des signatures.

C'est ainsi que l'identification de la signature à l'une des colonnes de la table permet de localiser le défaut

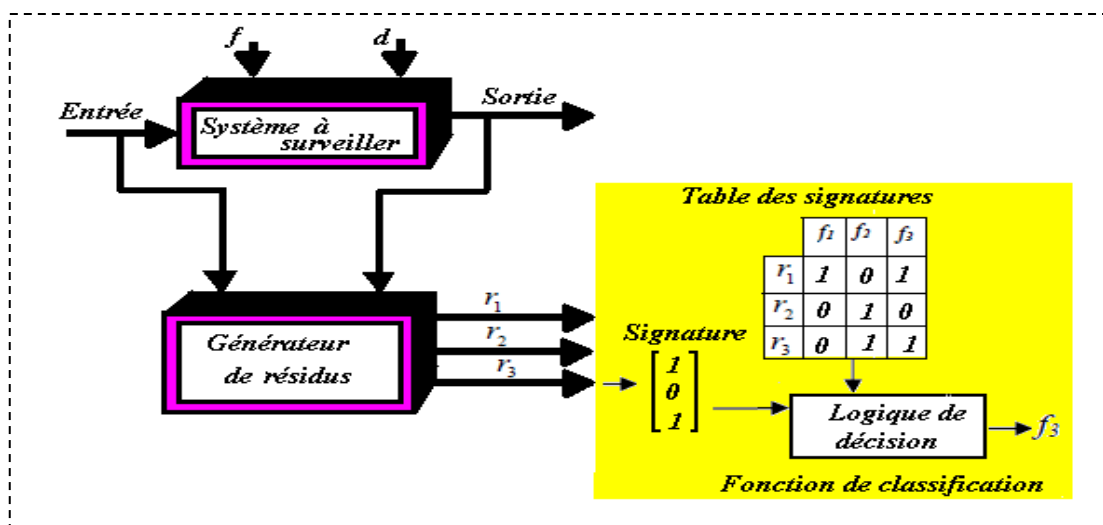


Figure II-8 : Détection et localisation des défauts

Remarque : La localisation des défauts nécessite la mise en œuvre d’une logique capable d’interpréter correctement la signature issue de la comparaison des résidus à des seuils prés défini.

II-6 Système tolérants aux défauts

L’objectif d’une commande tolérante aux défauts consiste à déterminer une stratégie de commande qui permet de limiter, voir d’annuler, les effets d’un défaut sur les performances du système.

II-6 -1 Classification des approches FTC

La classification des approches de la commande tolérante aux défauts peut se reposée sur les effets d’un défaut sur les performances du système. Dont, en présence d’un défaut de faible gravité, une simple commande robuste peut assurer le maintien des performances nominales. Mais dont le cas d’un défaut critique, la détection et la localisation de ce dernier est nécessaire afin de mettre en œuvre une stratégie active de tolérante aux défauts. On distingue alors deux classes qui peuvent être résumées comme suit :

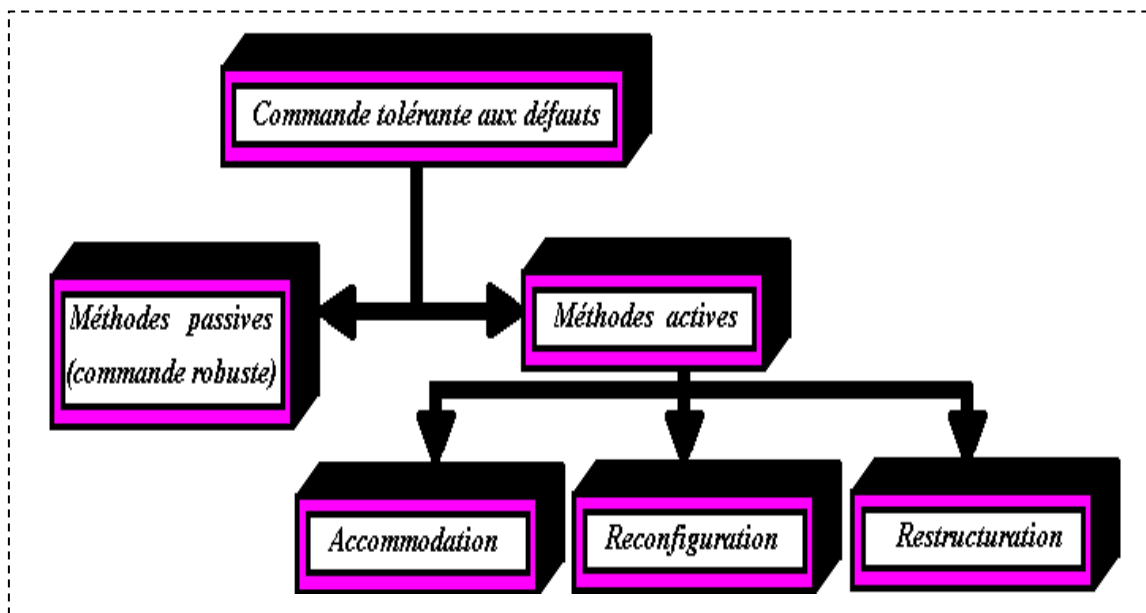


Figure II-9 : Classification des commandes tolérantes aux défauts

II-6 -2 Approche passive de la commande FTC

Dans l'approche passive, les stratégies de commande sont basées sur l'idée de synthétiser une commande permettant de rendre le système insensible aux incertitudes de modélisation et à certains défauts connus a priori. Les défauts sont alors pris en compte dans la conception du système de commande. La méthode est basée sur l'idée simple que les défauts représentent des perturbations que la loi de commande doit prendre en considération dès sa conception initiale, par conséquent aucune information en ligne sur ces défauts n'est nécessaire. Un bloc de détection, localisation et d'estimation des défauts n'est pas indispensable. L'inconvénient majeur de ces approches réside dans le fait que la robustesse accrue vis-à-vis de certains défauts est obtenue au dépend d'un niveau de performance dégradé en régime normale de fonctionnement. De plus, la classe des défauts considérés est limitée, il devient, alors, très risqué d'utiliser la commande passive tolérante aux défauts seule. Néanmoins, dans certaines applications où la classe de défauts est connue est restreint, ces stratégies pourraient s'avérer suffisante [33].

II-6 -3 Approche active de la commande FTC

A la différence de l'approche passive, l'approche active de la commande tolérante aux défauts intègre un module de diagnostic permettant de détecter et de localiser les défauts imprévus pouvant affecter le système. Une fois qu'un défaut est détecté lors de la phase de diagnostic, la stratégie de la FTC est activée via un mécanisme de reconfiguration.

Généralement, on distingue trois classes différences :

1. **L'accommodation des défauts**: elle agit que sur les défauts de faible amplitude. La nouvelle loi de commande est générée par l'adaptation en ligne des paramètres du régulateur et les entrées / sorties entre la loi de commande, sans modifier la structure du système.
2. **La reconfiguration du système** : elle est utilisée dans le cas où les parties défaillantes ne peuvent pas être accommodées. Elle est caractérisé par la modification des entrées / sorties entre la loi de commande et le système à contrôler à travers un changement des paramètres et de la structure de la loi de commande.
3. **La restructuration** : il consisté dans la synthétisation d'une nouvelle loi de commande en modifiant la structure et les paramètres de cette dernière. Elle est

utilisée dans le cas où le problème de commande n'a pas de solution avec l'accommodation et la reconfiguration [33].

II-6 -4 L'architecture d'une commande FTC active

La commande FTC active est amené à réagir aux diverses défaillances du système en accommodant ou en reconfigurant les lois de commande tout en préservant la stabilité et les performances de celui-ci. L'architecture d'une commande FTC active est décrite comme le montre la figure suivante :

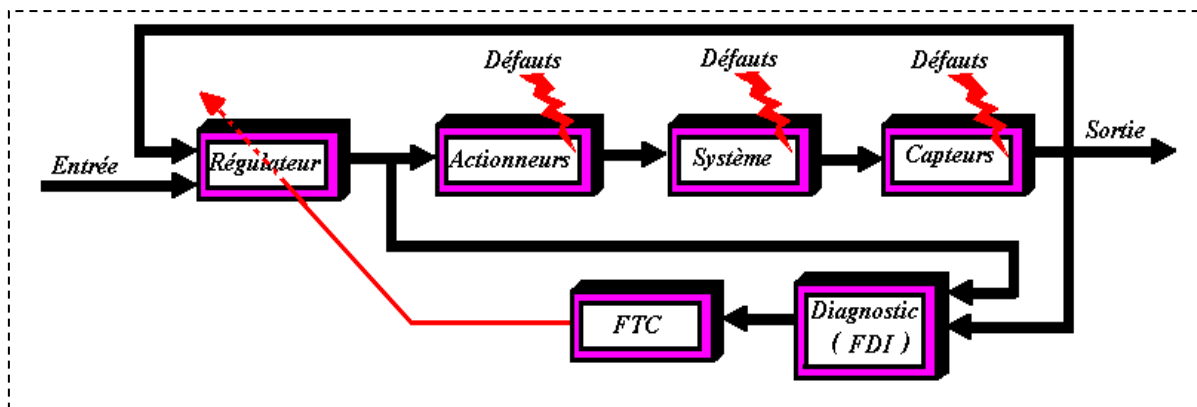


Figure II-9 : Schéma de principe d'une loi de commande FTC active

Le principe fonctionnel de la commande FTC, se repose sur le fonctionnement duel des deux blocs, à savoir le bloc FDI et le bloc FTC ; qui peut être résumé comme suit :

- c) **Le bloc FDI** : sa fonction principale est la détection et l'estimation du défaut ainsi que les variables d'états du système en ligne. Une fois que le défaut est apparu, le bloc FDI fournit en ligne les informations identifiants le défaut et l'état du système au bloc FTC.
- d) **Le bloc FTC** : le fonctionnement du FTC dépend des informations fournis par le bloc FDI. En fonction du mécanisme utilisé et du défaut survenu, il procède à l'accommodation ou a la reconfiguration en ligne de la loi de commande.

II-7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré au principe de la commande tolérante aux défauts. Dans un premier temps, nous avons exposé les différents types de défauts qui peuvent apparaître dans un

procédé industriel, ainsi que leur modélisation. Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à la méthode de diagnostic à base de modèle (FDI), pour la détection et la localisation des défauts. Ensuite, nous avons présenté une analyse des différentes approches d'accommodation des défauts, à savoir l'approche active et l'approche passive, qui a permis de mettre en évidence les limitations des approches passives. Nous nous sommes alors intéressés aux méthodes actives.

CHAPITRE III

Commande tolérante aux fautes d'un bras manipulateur téléopéré

III-1 Introduction

Un système de commande tolérant aux défauts (*FTC*) est capable d'une part de détecter la présence de défauts dans les capteurs et/ou les actionneurs et d'autre part d'adapter ou reconfigurer adéquatement le signal de commande afin de maintenir les performances prédéfinies en termes de qualité de production, sécurité ...etc.

La façon la plus commune de concevoir un système *FTC* est de diviser le problème en deux phases distinctes. La première phase concerne le problème de détection et d'isolation des défauts (*FDI : Fault Detection and Isolation*) qui consiste en la conception d'un filtre capable; sur la base des entrées sorties mesurées; de détecter la présence d'un défaut ou éventuellement complètement l'isoler. Dans la seconde phase, on s'intéresse à la conception d'une unité de décision qui assure ; sur la base des informations fournies par l'unité *FDI* ; la reconfiguration de la commande afin de compenser les effets des défauts et de respecter les contraintes de performances [31].

L'objectif de ce chapitre est de présenter une technique de commande tolérante aux défauts, applicable sur un robot distant de type SCARA.

III-2 Modélisation du système

Le système modélisé est un bras manipulateur de type SCARA à trois degré de liberté. Le système global comprend le bras maître, le bras esclave et les accessoires de commande et de communication.

Dans ce qui suit, nous nous limitons à l'étude en vu l'application de la commande tolérante aux défauts du seul bras manipulateur esclave.

III-2-1 Modèle du robot manipulateur

Le robot étudié est un robot SCARA à trois degrés de liberté, composé de trois articulations rotoïdes, la figure suivante illustre le squelette et les paramètres structuraux du manipulateur [35].

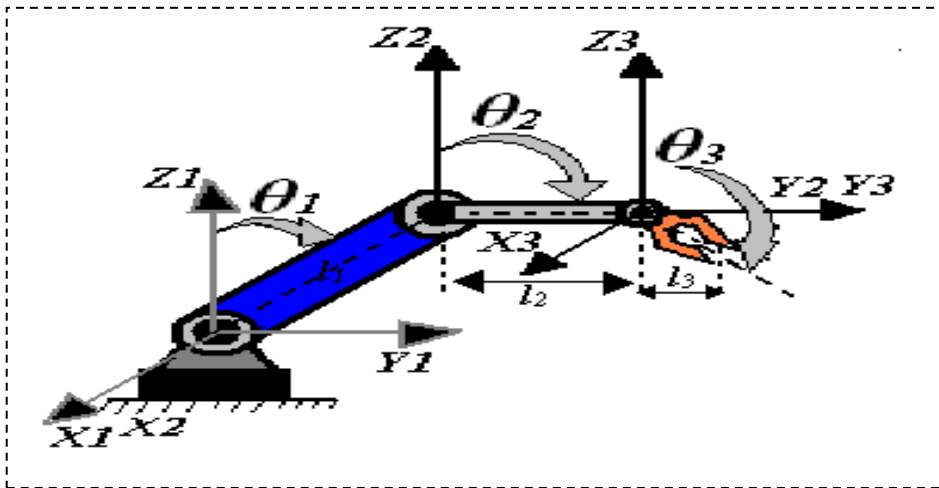


Figure III-1 : Squelette et paramètres structuraux du Robot SCARA

Le modèle dynamique du robot peut être obtenu par l'utilisation de plusieurs formalismes, les méthodes les plus utilisées sont : le formalisme de Lagrange et le formalisme de Newton-Euler [34] les deux méthodes aboutit au même système d'équation différentiel décrivant le modèle dynamique des robots.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + \mu(\theta, \dot{\theta}, \tau, t) = \tau \tag{III-1}$$

La dynamique du système (déduite directement de (III-1) est :

$$\ddot{\theta} = M^{-1}\tau - M^{-1}(V + G + \mu) \tag{III-2}$$

Avec : $\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta \in \mathbb{R}^n$ dénote respectivement le vecteur accélération, vitesse et position articulaire. $\tau \in \mathbb{R}^n$ représente le vecteur des couples / forces d'entrées, $M(\theta) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ est la matrice d'inertie dont l'inverse existe, $V(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^n$ représente le vecteur des forces centrifuges, $G(\theta) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur gravitationnel, $\mu(\theta, \dot{\theta}, \tau, t) \in \mathbb{R}^n$ englobe toutes les dynamiques négligées et n le nombre de degrés de liberté.

III-2-2 Classification des défauts

Tout changement dans la dynamique de fonctionnement nominale du système est considéré comme étant un défaut. Un changement qui peut être vu comme cause [35, 36]:

- ◆ Défauts au niveau des capteurs de position ou de vitesse.
- ◆ Défauts dans la structure mécanique, par exemple le blocage d'une articulation.

- ◆ Défauts d'actionneur qui peuvent apparaître soit au niveau de la commande au niveau du moteur.

Comme tout système industriel, les défauts peuvent être répartis selon leur effets en deux catégories, les défauts catastrophiques et les défauts non catastrophiques. La première catégorie est impossible d'accommoder ces effets, le seul moyen de remédier à cette anomalie est de procéder au changement du composant défectueux. A cet effet, nous avons mis en place d'un système qui génère un signal d'alarme à l'opérateur et qui assure l'arrêt du fonctionnement de la structure. Pour les effets de la seconde catégorie, peuvent être corrigés en modifiant la loi de commande lors de leur apparition.

III-2-3 Modélisation des défauts

Apparition ou le non apparition des défauts, dépend de l'état et des entrées du système. Ces derniers peuvent être représentés par le modèle générale :

$$F(\theta, \dot{\theta}, \tau, t) = \beta(t - T)f(\theta, \dot{\theta}, \tau) \quad (\text{III-3})$$

Avec $F(\theta, \dot{\theta}, \tau, t) \in \mathbb{R}^n$: dénote la dynamique du défaut, $\beta(t - T) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ traduit l'apparition ou pas d'un défaut considéré et T indique l'instant d'apparition du défaut.

$$\beta(t - T) = \begin{cases} 0 & \text{si } t \leq T \\ 1 & \text{si } t \geq T \end{cases} \quad (\text{III-4})$$

Supposons que N types de défauts, dont la dynamique est connue, agissant sur le système :

$$A = \{f_1(\theta, \dot{\theta}, \tau), \dots, f_N(\theta, \dot{\theta}, \tau)\} \quad (\text{III-5})$$

Compte tenu de la relation (III-3), en conclut qu'il existe $2^N - 1$ combinaisons différentes pour l'apparition des ces défauts. L'ensemble des combinaisons peuvent être écrit comme suit :

$$P(A) = \{f_1(\theta, \dot{\theta}, \tau), \dots, f_{2^N-1}(\theta, \dot{\theta}, \tau)\} \setminus \{\emptyset\} \quad (\text{III-6})$$

Par conséquent un ensemble complet de défauts dans le système est :

$$\Phi = \{f_0(\theta, \dot{\theta}, \tau), P(A)\} \quad (\text{III-7})$$

Où f_0 est le défaut inconnu.

Chaque défauts est supposé à paramètres linéaires, peut être modélisé sous la forme :

$$f_m(\theta, \dot{\theta}, \tau) = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^s c_{1i}^m w_{1i}^m(\theta_1, \dot{\theta}_1, \tau_1) \\ \sum_{i=1}^s c_{2i}^m w_{2i}^m(\theta_2, \dot{\theta}_2, \tau_2) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^s c_{ni}^m w_{ni}^m(\theta_n, \dot{\theta}_n, \tau_n) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^s \begin{bmatrix} c_{1i}^m w_{1i}^m(\theta_1, \dot{\theta}_1, \tau_1) \\ c_{2i}^m w_{2i}^m(\theta_2, \dot{\theta}_2, \tau_2) \\ \vdots \\ c_{ni}^m w_{ni}^m(\theta_n, \dot{\theta}_n, \tau_n) \end{bmatrix}$$

$$= \sum_{i=1}^s \begin{bmatrix} c_{1i}^m & 0 & \dots & 0 \\ 0 & c_{2i}^m & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & c_{ni}^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{1i}^m w_{1i}^m(\theta_1, \dot{\theta}_1, \tau_1) \\ c_{2i}^m w_{2i}^m(\theta_2, \dot{\theta}_2, \tau_2) \\ \vdots \\ c_{ni}^m w_{ni}^m(\theta_n, \dot{\theta}_n, \tau_n) \end{bmatrix}$$

$$f_m(\theta, \dot{\theta}, \tau) = \sum_{i=1}^s \text{diag} [c_{mi}] w_{mi}(\theta, \dot{\theta}, \tau), \text{ pour } m = 1, 2, \dots, 2^N - 1 \tag{III-8}$$

Où $c_{mi} \in R^n$ est le vecteur de pondération et $w_{mi} \in R^n$ est le vecteur représentant la dynamique des défauts. s : est une constante représentant le nombre des neurones de RBF.

De la relation (II-7), en remarque que les défauts sont dépendent de manière générale des états du système (position et vitesse) et du couple d'entrée. Dont il est important de distinguer entre eux [35], alors la relation (II-7) est réécrite comme suit :

$$f_m(\theta, \dot{\theta}, \tau) = f_{m\theta}(\theta, \dot{\theta}) + f_{m\tau}(\tau) \tag{II-9}$$

Où $f_{m\theta}(\theta, \dot{\theta})$ et $f_{m\tau}(\tau)$ représente les défauts actionneurs et composant.

En tenant en compte des défauts précédents, le modèle du robot (II-1), devient :

$$\underbrace{M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + \mu(\theta, \dot{\theta}, \tau, t)}_{\text{Le modèle dynamique de robot}} - \underbrace{\beta(t - T)(f_{m\theta}(\theta, \dot{\theta}) + f_{m\tau}(\tau))}_{\text{La dynamique des défauts}} = \underbrace{\tau}_{\text{Couple d'entrée}} \tag{II-10}$$

Le modèle dynamique de robot

La dynamique des défauts

Couple d'entrée

III-3 Structure de la TFC

La structure de la commande FTC utilisée, est comme l'illustre la figure (III-2) :

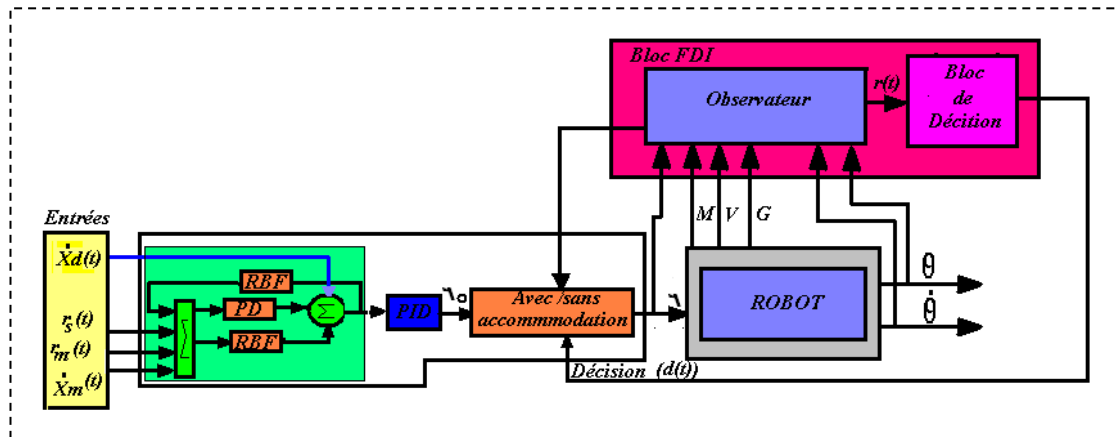


Figure III-2 : Structure de la commande FTC

La stratégie de cette technique est le maintien de l'état d'entrée de la commande propre du robot (la commande du robot est de type PID) Le rôle de chaque bloc est dénoté comme suit :

- **Le bloc FDI** : son principe est basé sur deux étapes :
 - a. **Génération des résidus** : Différence entre les sorties mesurées et les sorties estimées ($e = \tilde{\theta} - \theta$), qui joue le rôle du vecteur résidu permettant la détection de la présence d'un défaut.
 - b. **Prise de décision** : les résidus sont examinés (dans notre cas comparaison à des résidus à un seuil pré défini) et ensuite une règle de décision est appliquée afin de décider le quel des deux modes de commande sélection, à savoir avec accommodation ou sans accommodation.

- **Le bloc de contrôle** : Assure respectivement le maintien ou la modification de la loi de commande, dans le cas de non apparition ou d'apparition de défauts.

III-3-1 Detection et l'estimation des défauts

Ce bloc assure est double fonction la détection est l'estimation des défauts. Dont, dans le cas de fonctionnement sain cette unité sert à détecter l'apparition d'un défaut, une fois le défaut est détecté, son rôle consiste à l'estimer afin de reconfigurer la loi de commande.

Dans ce qui suit, nous considérerons le cas général d'un robot à « n » degré de liberté et que les estime des défauts sont donnees par :

- Défauts qui dépendent du couple :

$$\tilde{f}_\tau(\tau, t) = \begin{bmatrix} h_1(t)\tau_1 \\ h_2(t)\tau_2 \\ \vdots \\ h_n(t)\tau_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(t) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h_2(t) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & h_n(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_n \end{bmatrix} = \text{diag}[H(t)]\tau \quad \text{(III-11)}$$

- Défauts de la position et de la vitesse

$$\begin{aligned} \tilde{f}_\theta(\theta, \dot{\theta}, t) &= \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k l_{1i}(t)q_{1i}(\theta_1) \\ \sum_{i=1}^k l_{2i}(t)q_{2i}(\theta_2) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^k l_{ni}(t)q_{ni}(\theta_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k s_{1i}(t)Z_{1i}(\dot{\theta}_1) \\ \sum_{i=1}^k s_{2i}(t)Z_{2i}(\dot{\theta}_2) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^k s_{ni}(t)Z_{ni}(\dot{\theta}_n) \end{bmatrix} \\ &= \sum_{i=1}^k \begin{bmatrix} l_{1i}(t)q_{1i}(\theta_1) \\ l_{2i}(t)q_{2i}(\theta_2) \\ \vdots \\ l_{ni}(t)q_{ni}(\theta_n) \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^k \begin{bmatrix} s_{1i}(t)Z_{1i}(\dot{\theta}_1) \\ s_{2i}(t)Z_{2i}(\dot{\theta}_2) \\ \vdots \\ s_{ni}(t)Z_{ni}(\dot{\theta}_n) \end{bmatrix} \\ &= \sum_{i=1}^k \begin{bmatrix} l_{1i}(t) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & l_{1i}(t) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & l_{1i}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{1i}(\theta_1) \\ q_{2i}(\theta_2) \\ \vdots \\ q_{ni}(\theta_n) \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^k \begin{bmatrix} s_{1i}(t) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s_{1i}(t) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & s_{1i}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{1i}(\dot{\theta}_1) \\ Z_{2i}(\dot{\theta}_2) \\ \vdots \\ Z_{ni}(\dot{\theta}_n) \end{bmatrix} \\ &= \sum_{i=1}^k \text{diag}[L_i(t)]Q_i(\theta) + \sum_{i=1}^k \text{diag}[S_i(t)]Z_i(\dot{\theta}) \end{aligned}$$

$$\tilde{f}_\theta(\theta, \dot{\theta}, t) = \sum_{i=1}^k (\text{diag}[L_i(t)]Q_i(\theta) + \text{diag}[S_i(t)]Z_i(\theta)) \quad (\text{III-12})$$

Où $H(t) \in \mathbb{R}^n$, $L_i(t) \in \mathbb{R}^n$ et $S_i(t) \in \mathbb{R}^n$ représente les vecteurs de pondération des défauts.

Les dynamique des défauts qui dépendent de la position et des vitesses sont estimés en utilisant des réseaux de neurones à base radiale RBF (voir l'annexe), notant que dans notre cas :

$Q_i(\theta) = Z_i(\theta)$ représente les poids d'apprentissage.

La dynamique du système peut être réécrite sous la forme :

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} = & -M^{-1}(V + G) + M^{-1}(I + B \text{diag}[H])\tau \\ & + M^{-1}B(\sum_{i=1}^k (\text{diag}[L_i]Q_i + \text{diag}[S_i]Z_i)) \end{aligned} \quad (\text{III-13})$$

Nous définissons alors l'observateur suivant [35]

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} = & -M^{-1}(V + G) + M^{-1}(I - B \text{diag}[H])\tau \\ & + M^{-1} \sum_{i=1}^k (\text{diag}[L_i]Q_i + \text{diag}[S_i]Z_i) - \gamma(\dot{\theta} - \dot{\theta}) \end{aligned} \quad (\text{III-14})$$

$\gamma = [\gamma_1 \ \gamma_2 \ \dots \ \gamma_n]$ est une matrice définie positive.

III-3-1-1 Détection des défauts

La détection des défauts s'effectue par la comparaison entre les sorties mesurées et les sorties estimées, exprimée par l'erreur estimée : $e = \tilde{\theta} - \theta$.

Tandis qu'aucun défaut ne produit et en négligeant les dynamiques non modélisées, la dynamique du système est représenté par la relation (III-2).

En réalité on ne peut pas exclure les incertitudes de modélisation ; à l'absence des défauts, toutes pondérations à estimer sont nulles. L'expression de l'observateur (III-14) sera :

$$\ddot{\theta} = -M^{-1}(V + G) + M^{-1}\tau - \gamma(\dot{\theta} - \dot{\theta}) \quad (\text{III-15})$$

Par comparaison entre la relation (III-2) et la relation (III-15), on conclut que la dynamique de l'erreur est :

$$\dot{e} = -\gamma e \quad (\text{III-16})$$

Etant donné que γ est défini positive alors e tend asymptotiquement vers zéro. Si un défaut apparaît, elle s'écarte notablement de zéro, ce que se traduit par la détection de ce dernier.

Dans le but d'éviter les fausses alarmes, les dynamiques non modélisées sont considérées. Ce qui modifie la relation (III-16) :

$$\Delta e = -\gamma e + M^{-1}\mu \quad (\text{III-17})$$

III-3-1-2 Estimation des défauts et prise de décision

Une fois que un défaut se produit ($\tilde{f}_g(\theta, \dot{\theta}, t) \neq 0$), l'observateur adapte comme expression la relation (III-14) :

Et considérant que toute anomalie dans le fonctionnement du système comme étant une erreur, par une analogie entre (III-14) et la relation (III-15) ; la dynamique de l'erreur sera :

$$\dot{e} = -\gamma e + M^{-1}\mu + M^{-1}diag[H]\tau + M^{-1}\sum_{i=1}^k (diag[L_i]Q_i + diag[S_i]Z_i) \quad (\text{III-18})$$

Par égalité entre les relations (III-17) et (III-18) on tire :

$$\dot{e} = \Delta e + M^{-1}diag[H]\tau + M^{-1}\sum_{i=1}^k (diag[L_i]Q_i + diag[S_i]Z_i)$$

$$\Delta e = \dot{e} - (M^{-1}diag[H]\tau + M^{-1}\sum_{i=1}^k (diag[L_i]Q_i + diag[S_i]Z_i))$$

Dans l'idée est de définir un seuil de détection $\varepsilon(t)$, tel que :

$$\begin{cases} \Delta e < \varepsilon(t) & \text{en absence de défauts} \\ \Delta e > \varepsilon(t) & \text{en présence de défauts} \end{cases} \quad (\text{III-19})$$

Notant que, l'estimation de l'erreur (dans notre cas) est assurée par un des réseaux de neurones de type RBF, le choix de la valeur du seuil s'effectue par la comparaison entre l'état de l'erreur estimée obtenu dans le cas de simulation avec défaut et sans défaut. La figure (III-3) résume la technique d'estimation des résidus (erreur) utilisée :

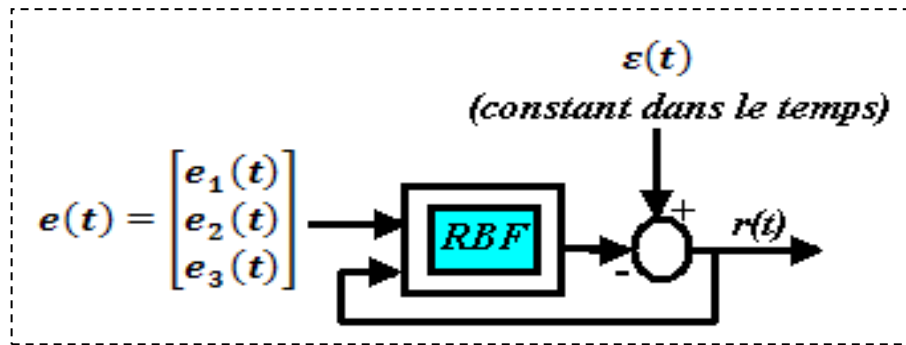


Figure III-2 : La technique d'estimation des résidus

III-3-1-3 Prise de décision

Le fonctionnement du bloc de décision, consiste dans la sélection du mode de commande (avec ou sans accommodation). Dont, le principe est basé sur la logique suivante :

$$\begin{cases} \Delta e > \varepsilon(t) \text{ et } \theta_i(t) \neq 0 & \text{correction (accommodation)} \\ \text{si } \theta_i(t) = 0 & \text{Activation d'alarme et blocage du procédé} \end{cases}$$

Dont la sélection s'effectue par la génération d'un signal $d(t)$ défini comme suit :

$$\begin{cases} d(t) = 0 & \text{si } \Delta e = \varepsilon(t) \\ d(t) = 1 & \text{si } \Delta e > \varepsilon(t) \end{cases} \quad \text{(III-20)}$$

III-3-2 Bloc de contrôle

Le fonctionnement de ce bloc comprend deux modes, qui peuvent être résumé comme suit :

- **Mode sans accommodation** : A l'absence des défauts ($\Delta e < \varepsilon(t)$), la commande du robot s'effectue à l'aide de la loi de commande, dans laquelle le mécanisme du robot est

considéré comme un système linéaire découplé, dont chaque articulation est asservie par une commande de type PID (proportionnel intégral dérivé).

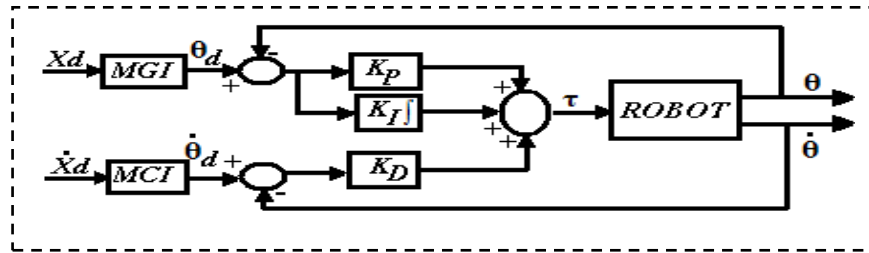


Figure III-3 : La commande PID

L'équation du couple est donnée par :

$$\tau = K_P(\theta_d - \theta) + K_D(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_I \int (\theta_d - \theta) dt \tag{III-21}$$

Où $\theta_d, \dot{\theta}_d \in \mathbb{R}^n$ représentent respectivement les vecteurs de position et vitesse articulaires désirée. Et $\theta, \dot{\theta} \in \mathbb{R}^n$ dénotent respectivement les vecteurs de position et vitesse articulaires mesurées.

$K_P \in \mathbb{R}^{n \times n}, K_D \in \mathbb{R}^{n \times n}$ et $K_I \in \mathbb{R}^{n \times n}$ sont des matrices constantes, diagonale positives.

Définissant ainsi, le couple correspondant au fonctionnement nominale, $\tau = \tau_0$ (dans notre cas mode 1).

- **Mode avec accommodation** : A la présence des défauts ($\Delta e > \epsilon(t)$), l'équation du le couple devient [35] :

$$\tau = (I + \text{diag}[H(t)])^{-1} (\tau_0 - \bar{F}_\theta(\theta, \dot{\theta}, t)) \tag{III-22}$$

Assurant l'accommodation des défauts.

En résumé, le bloc de contrôle est défini par le système d'équation (III-23)

$$\tau = \begin{cases} \tau_0 & \text{si } \Delta e = s(t) \\ (I + \text{diag}[H(t)])^{-1} (\tau_0 - \tilde{f}_\theta(\theta, \dot{\theta}, t)) & \text{si } \Delta e > \varepsilon(t) \end{cases} \quad (\text{III-23})$$

III-4 Le système de téléopération complet

La stratégie de communication entre le site maître, le site esclave et est l'opérateur humain forme le système de téléopération complet, illustré dans la figure (III-4).

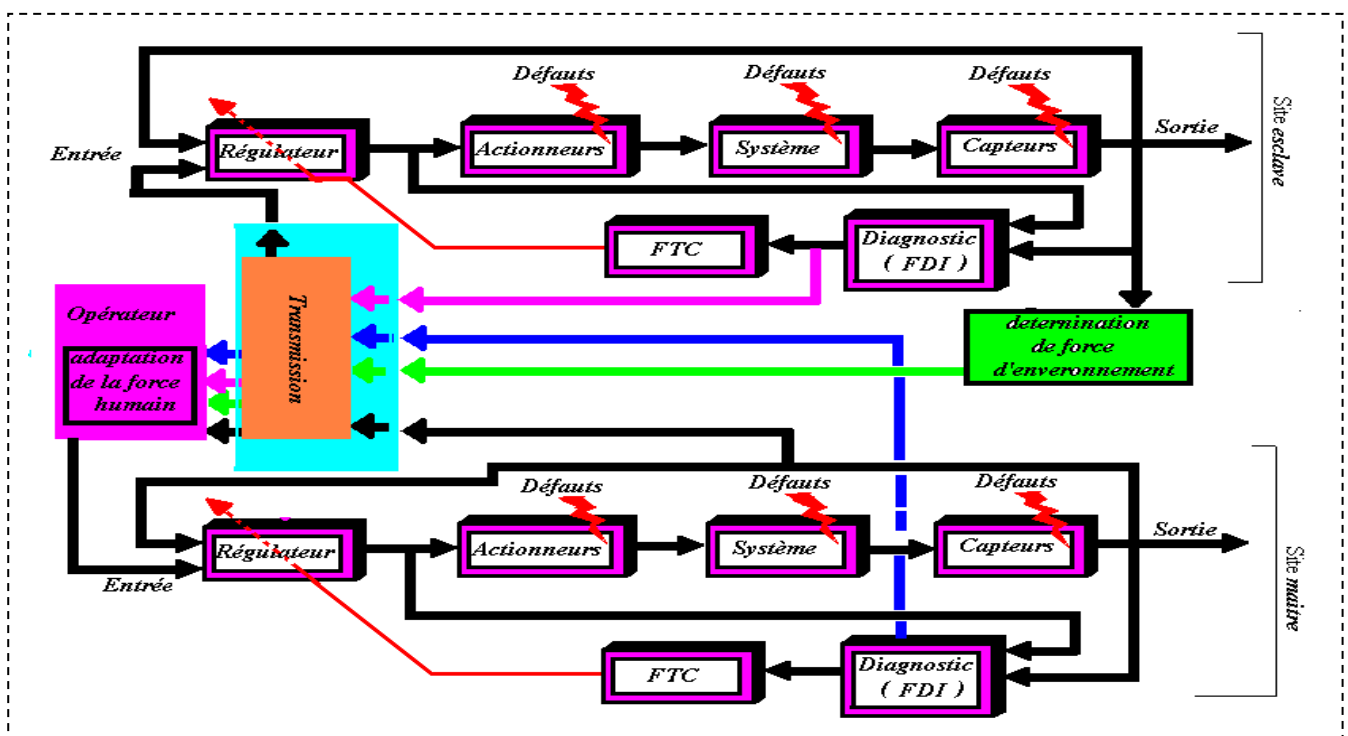


Figure III-4: Le système de téléopération global.

III-5 conclusion

Ce chapitre s'intéresse au problème de détection, d'estimation et d'accommodation des défauts pour les robots manipulateurs et les robots manipulateurs distant.

La première phase est consacré à la modélisation du système et les différent type de défauts, a savoir les défauts actionneurs et les défauts composants, la second phase consisté à concevoir un bloc de détection et d'estimation des défauts. Ce dernier, sa fonction principale

est la détection et l'estimation du défaut ainsi que les variables d'états du système en ligne. Une fois que le défaut est apparu, le bloc détection et d'estimation fournit en ligne les informations identifiants le défaut et l'état du système au bloc de commande tolérant aux fautes. Enfin, la dernière phase est la mise en place d'une commande tolérante active aux défauts sur le système. Cette dernière, assure en fonction du mécanisme utilisé et du défaut survenu, l'accommodation ou a la reconfiguration en ligne de la loi de commande.

CHAPITRE IV

Résultats de simulations

IV-1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de simulation effectuée sous l'environnement Matlab/simulink afin de tester les performances d'une commande tolérante aux défauts à un bras manipulateur d'un robot SCARA téléopéré.

Dont en premier temps, nous exposerons l'influence de défauts sur le fonctionnement du système sans appliquer la stratégie adoptée de la commande tolérante aux défauts(FTC). Dans le second cas de simulation, nous présentons les résultats obtenues lors d'application de la FTC dans le cas de fonctionnement sans aucuns défauts dans chacun des deux robots et le comportement des incertitudes. En troisième temps, nous illustrons les différents cas de présence de défauts (actionneur /composantes) dans chacun des deux sites (maitre /esclave).

IV-2 Modèles du système simulé sous MATLAB/SIMULINK

Les figures (IV-1), (IV-2), (IV-3) et (IV-4) montrent les blocs simulés sous l'environnement *MATLAB/SIMULINK*, qui nous ont permis de simuler le système de téléopération maître-esclave avec retour d'effort.

Dans les figures (IV-5), (IV-6), (IV-7), (IV-8) et (IV-9), on montre les résultats de simulation obtenus.

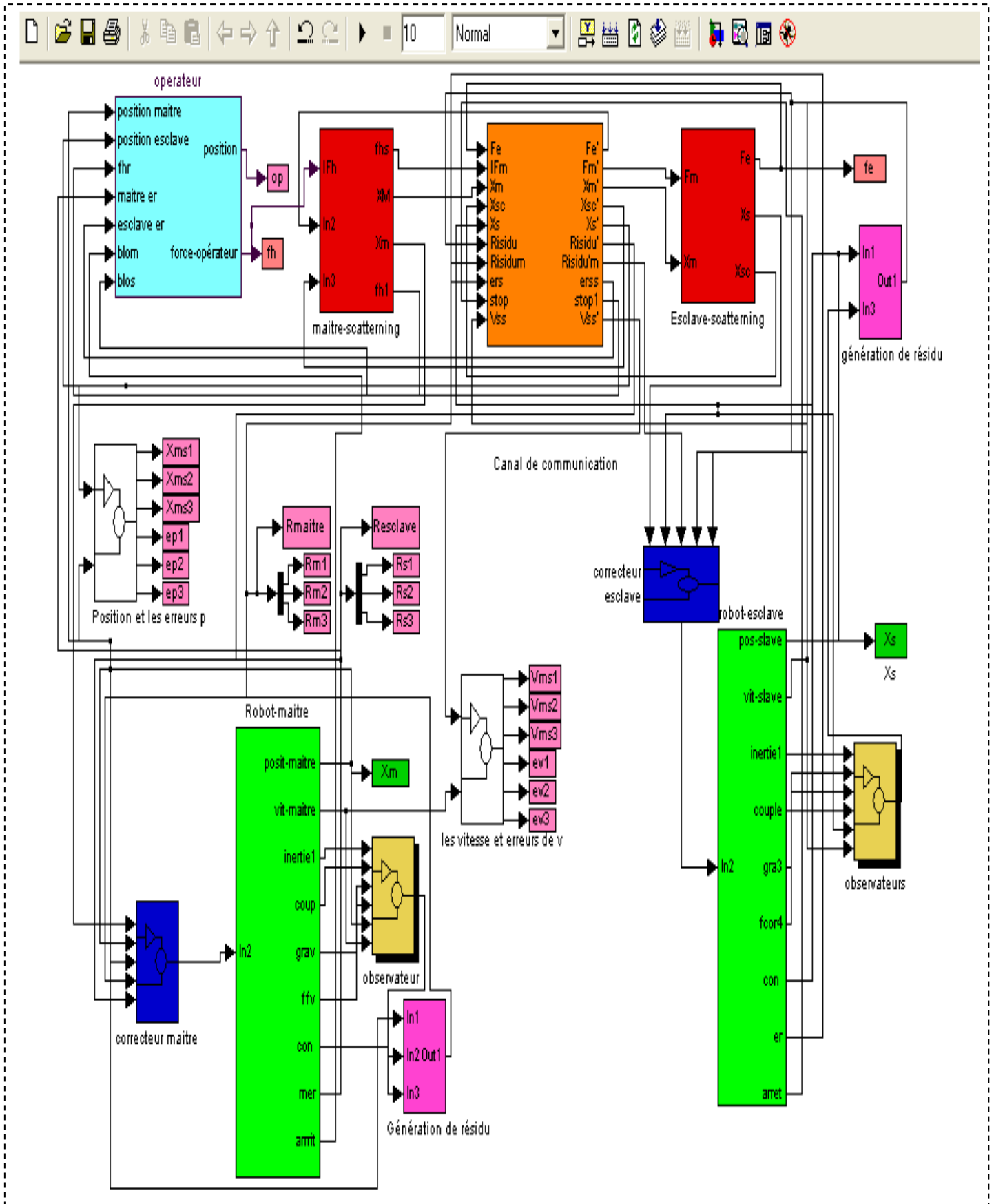


Figure IV-1: Schéma simulink du système de téléopération globale.

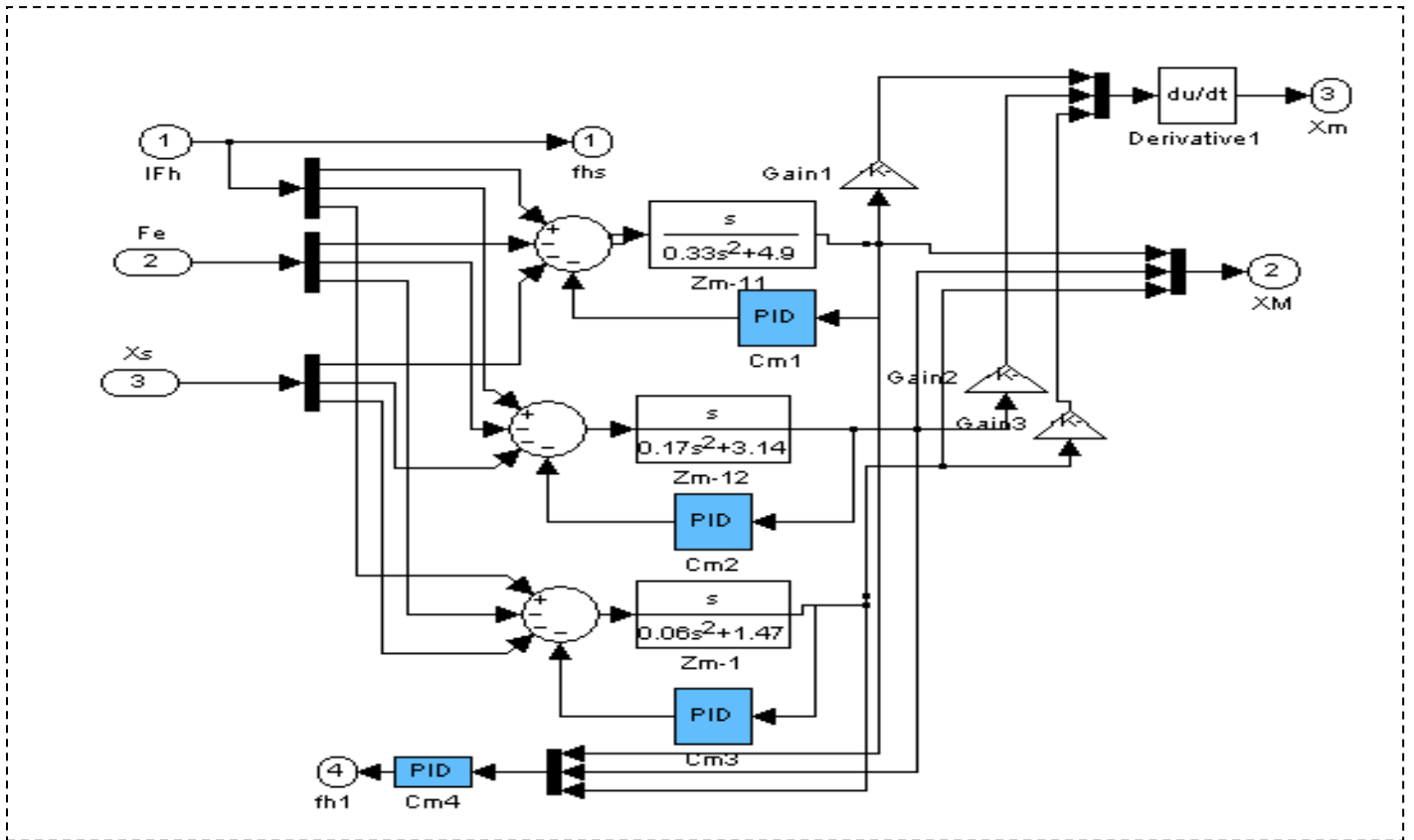


Figure IV-2: Schéma simulink du Scattering du site maître

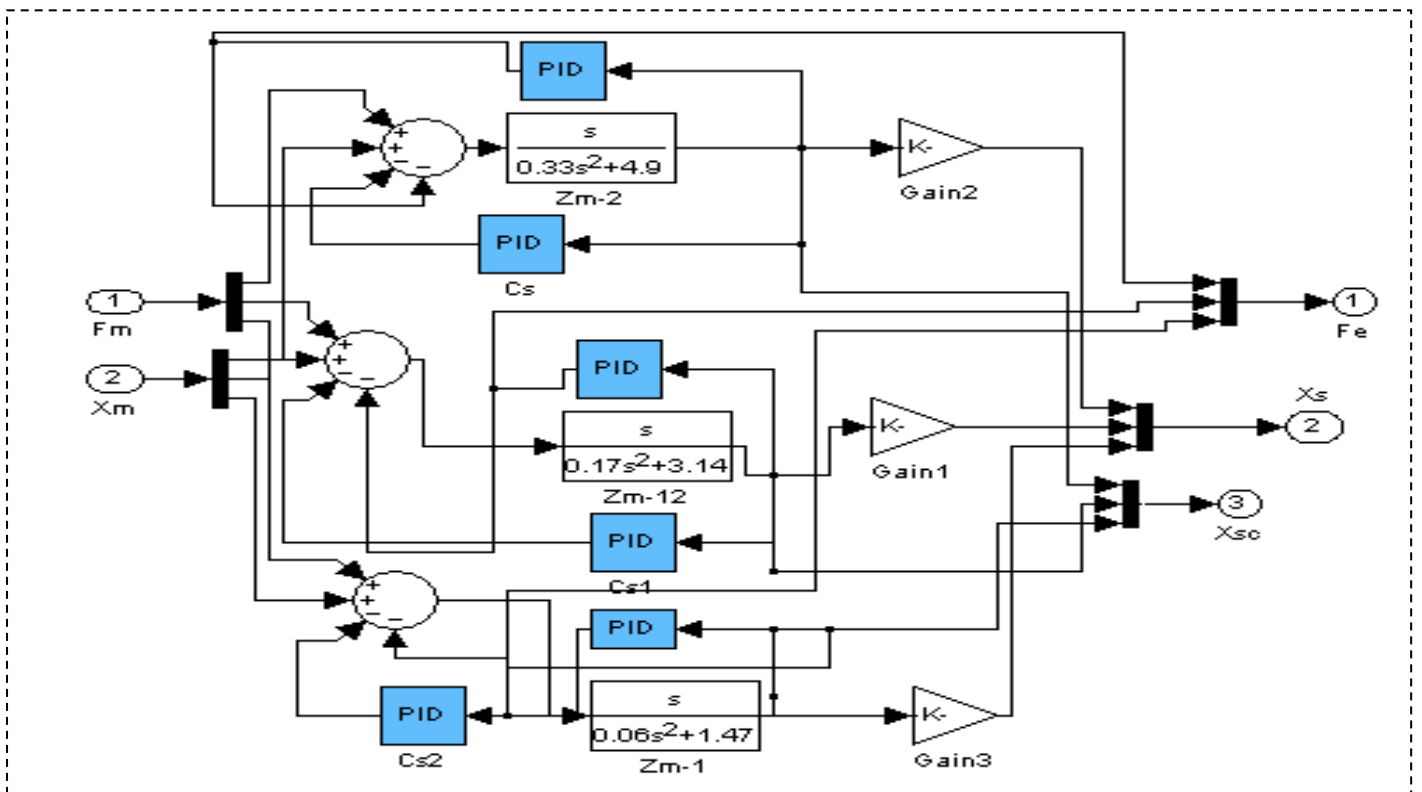


Figure IV-2: Schéma simulink du Scattering du site esclave

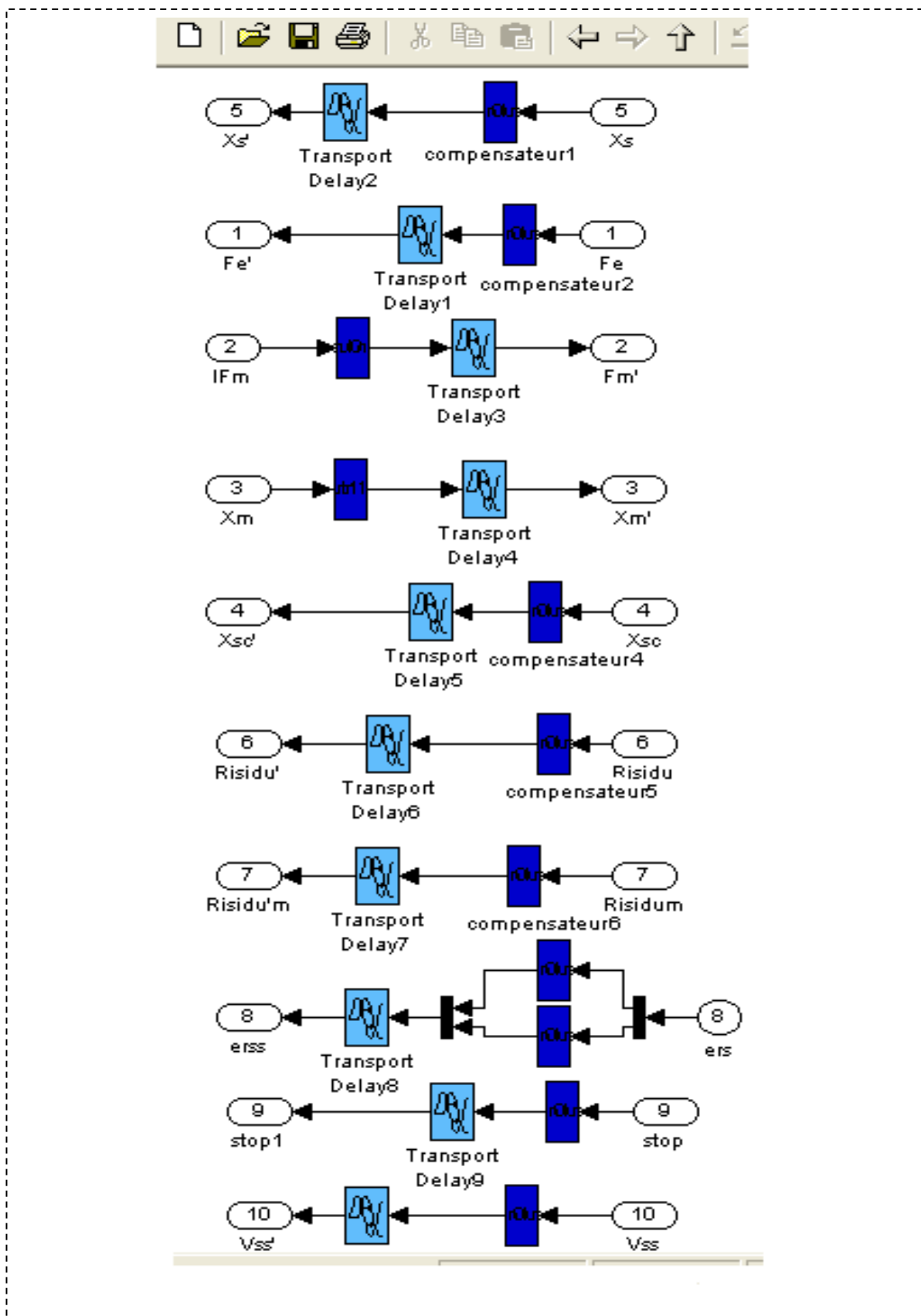


Figure IV-3 : Schéma Simulink du canal de communication

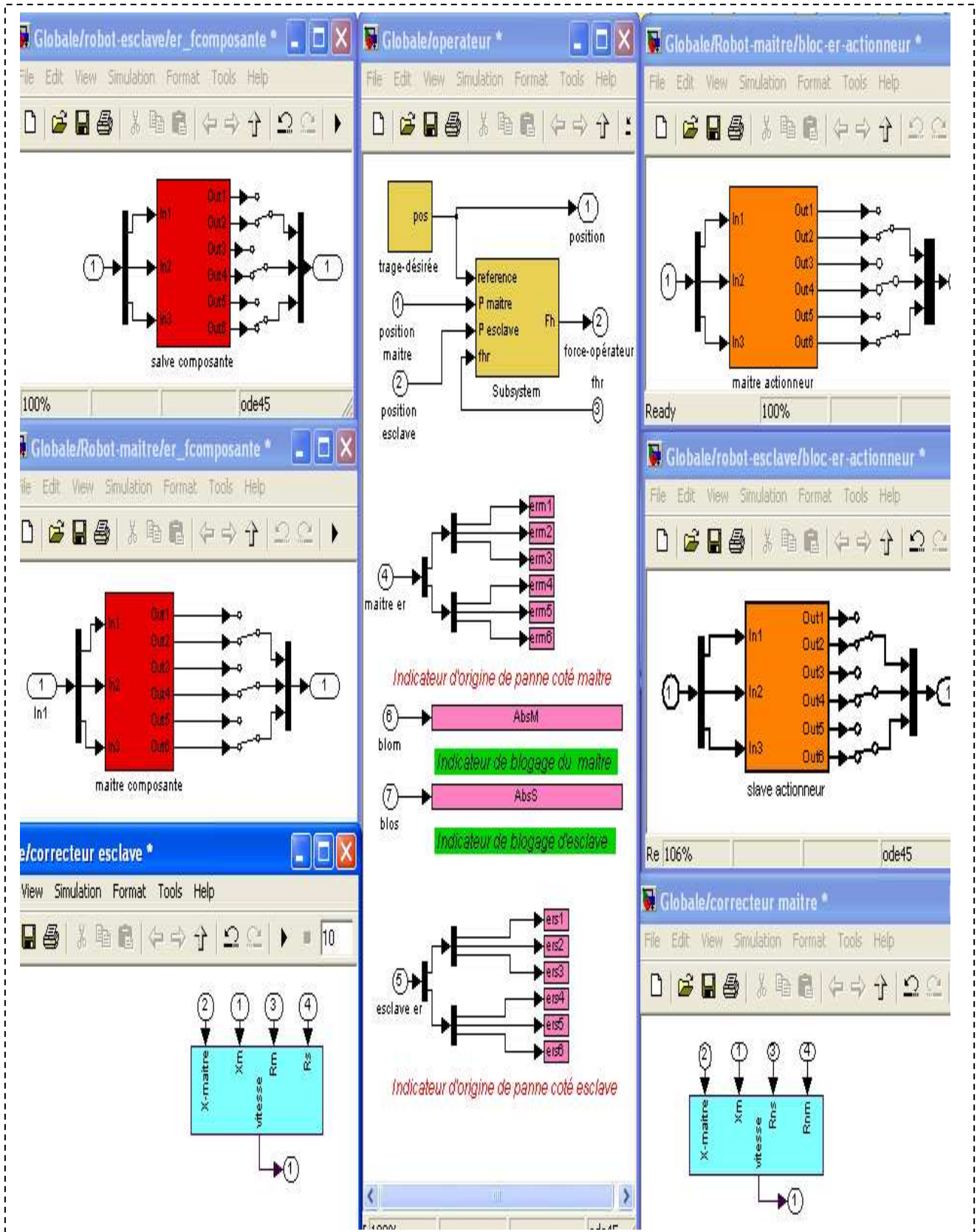


Figure IV-4 : les blocs de génération des défauts (rouge/orange), le régulateur maitre et le régulateur esclave (vert), le bloc opérateur(Jaune) et les indicateurs d’alarmes (rose).

IV-3 Influence des défauts sur le fonctionnement du système

Les figures (IV-5) et (IV-6) illustrent respectivement les allures des positions articulaires et les vitesses de chaque robot lors d'apparition d'un défaut au niveau du robot esclave, permettant ainsi d'évaluer la synchronisation entre les deux robots.

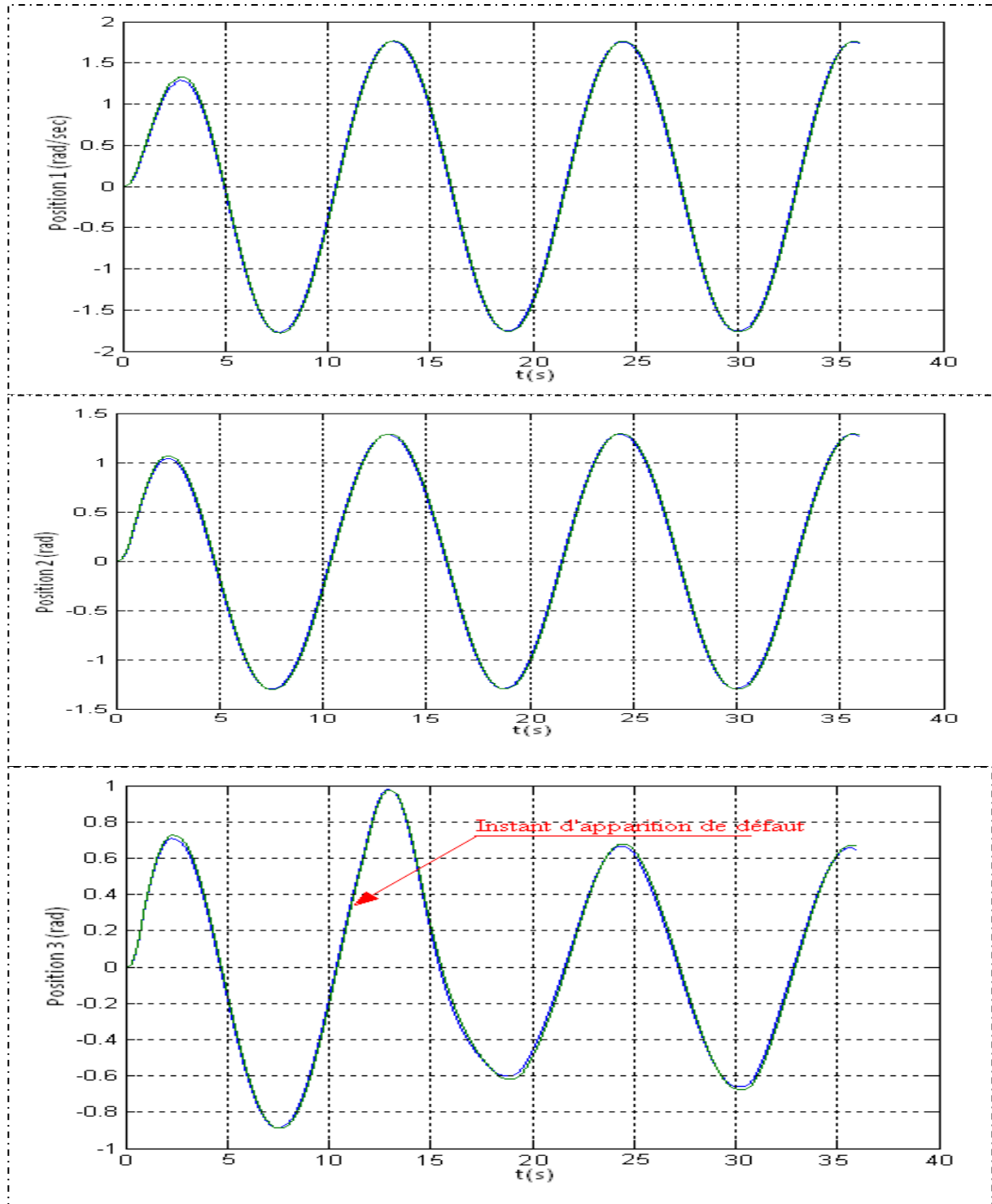


Figure IV-5 : Positions articulaires (Maitre/esclave).

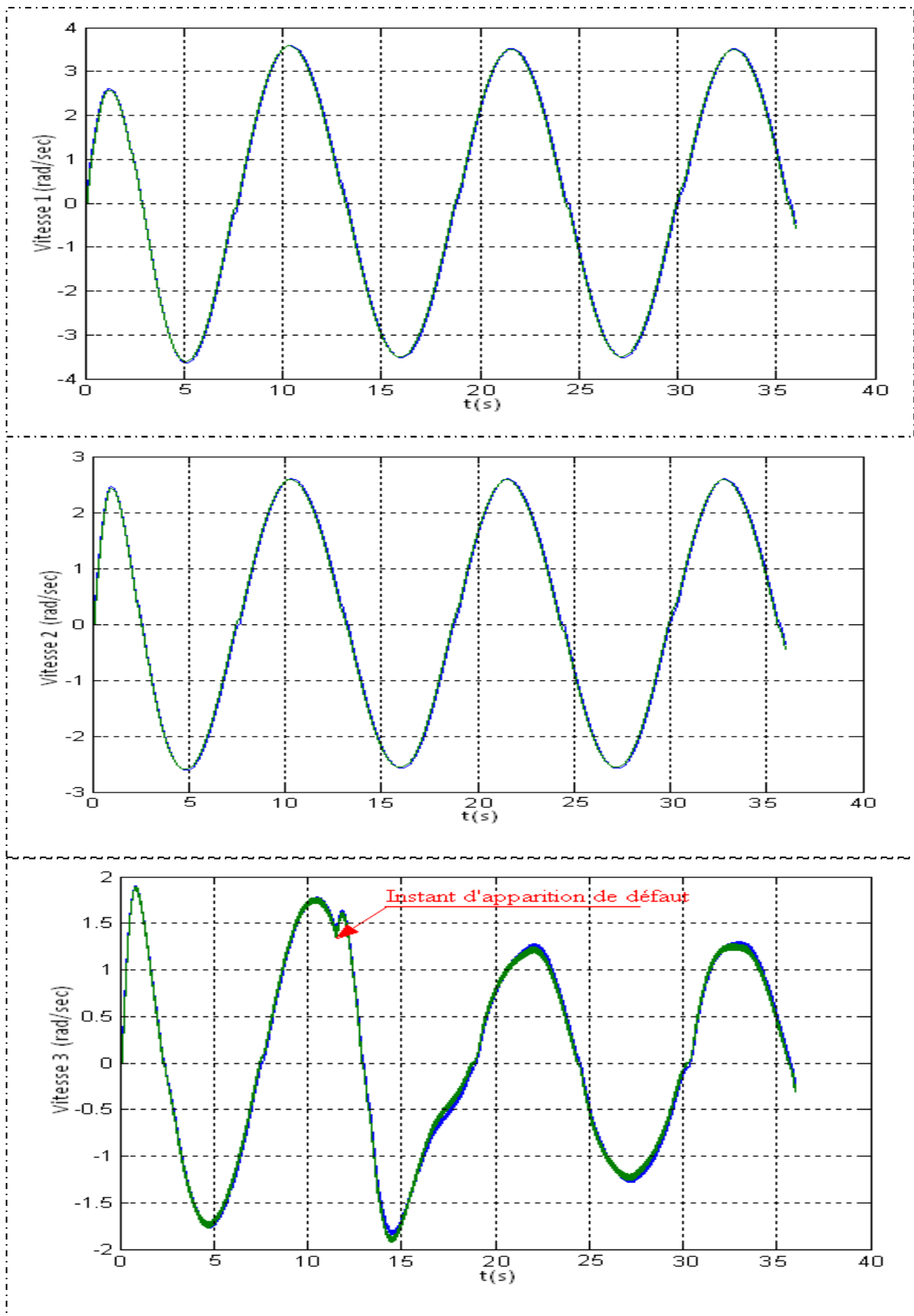


Figure IV-6 : Vitesses articulaires (Maitre/esclave).

➤ **Interprétation des résultats :**

Les figures (IV-5) et (IV-6) illustrent respectivement le comportement des positions et les vitesses articulaires des deux robots (maitre /esclave), dans le cas d'apparition de défaut de type composants au niveau de la troisième articulation du bras manipulateur esclave. Nous constatons que les deux robots (bras manipulateur) développent un même comportement, pratiquement sans aucun retard, ce que se traduit par l'imitation du bras maitre par le bras esclave. L'objectif de la commande du bras distant est alors atteint.

IV-4 Fonctionnement du système sans défauts

Les figures suivantes illustrent les différentes courbes décrivant respectivement le comportement des positions et des vitesses articulaires du système maître-esclave obtenues lors de simulation sans défauts.

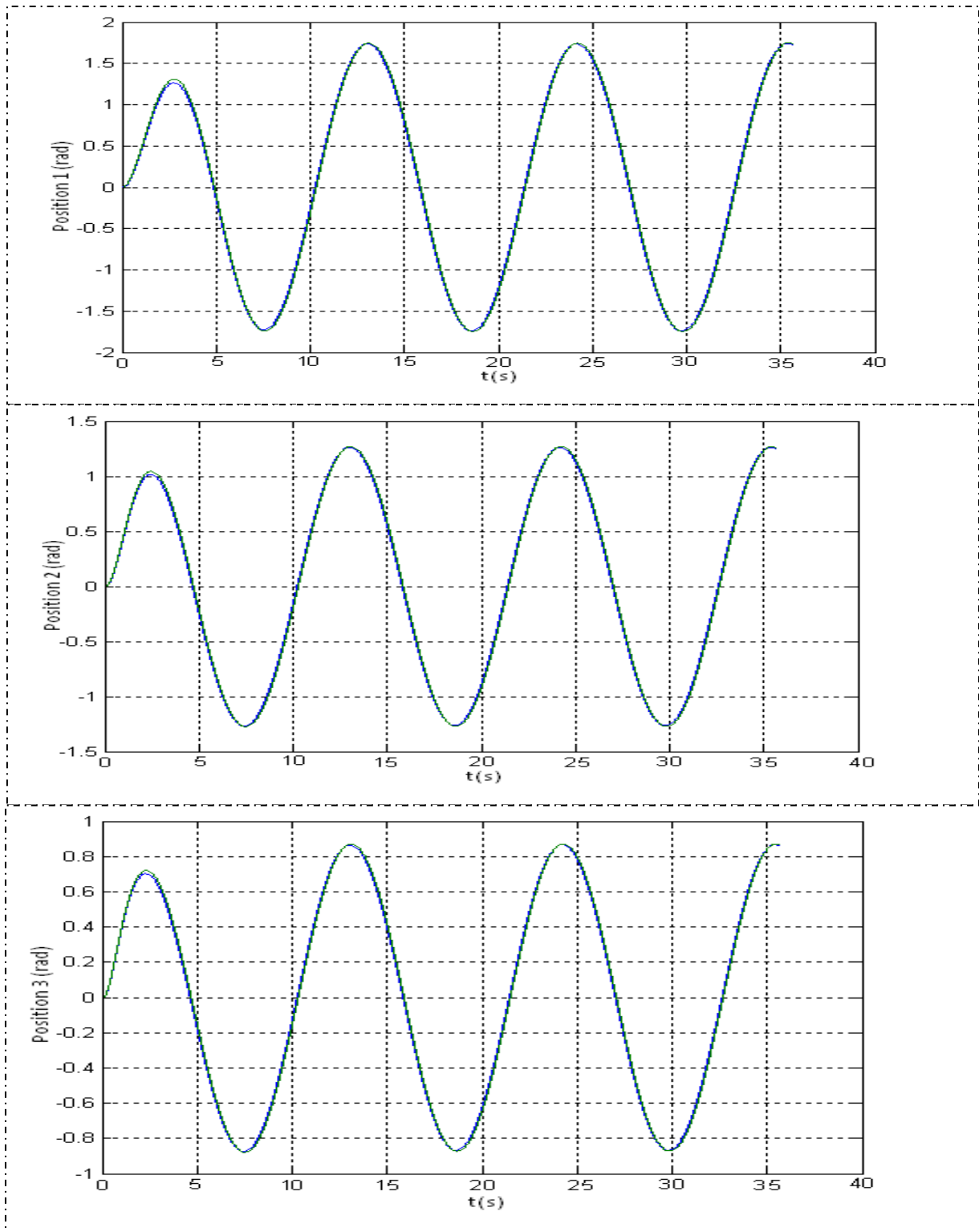


Figure IV-7: Positions articulaires (Maître/esclave).

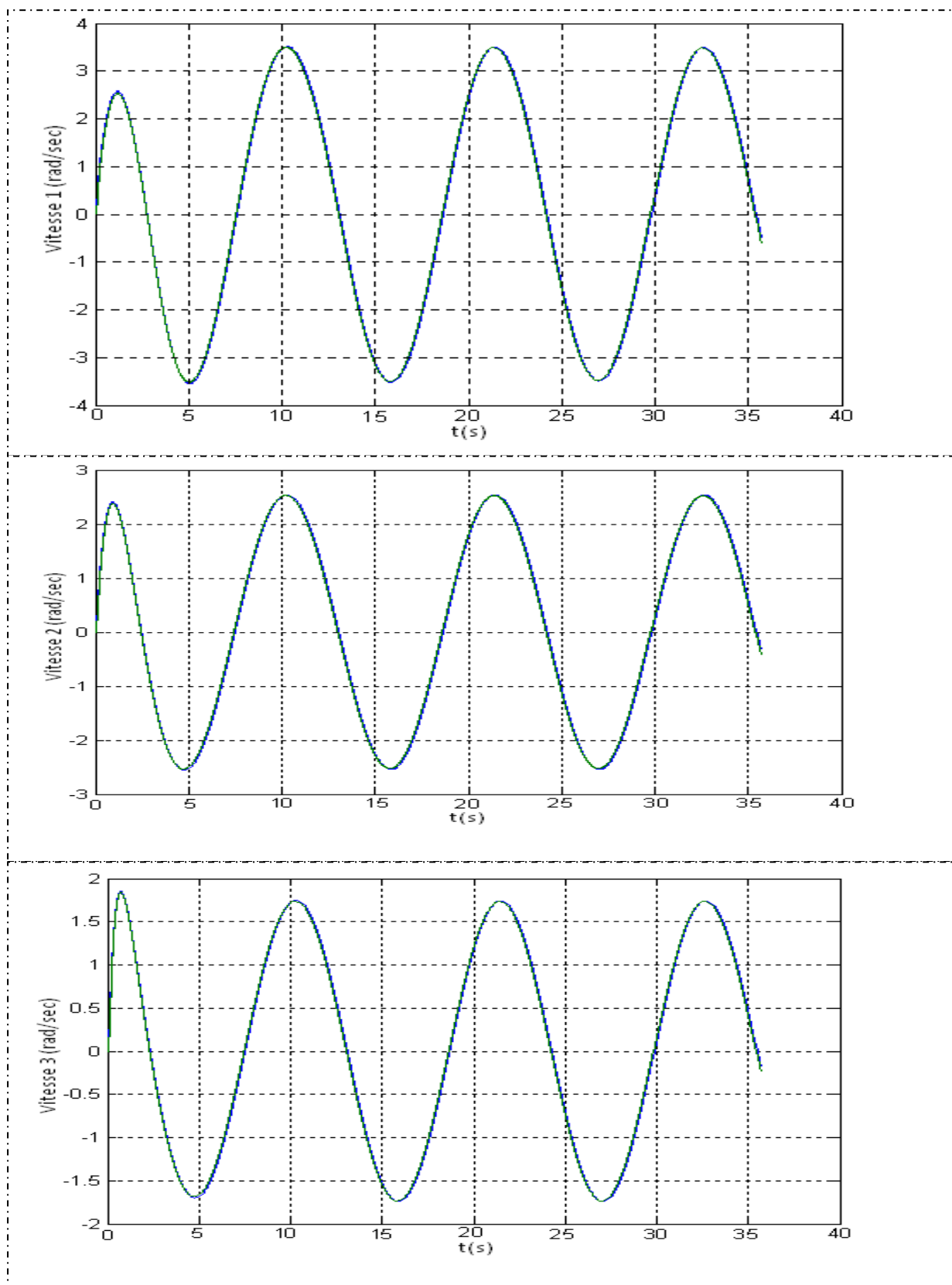


Figure IV-8 : Vitesses articulaires (Maitre/esclave).

La figure (IV-9), illustre la forme des erreurs entre les différentes positions articulaires des deux robots.

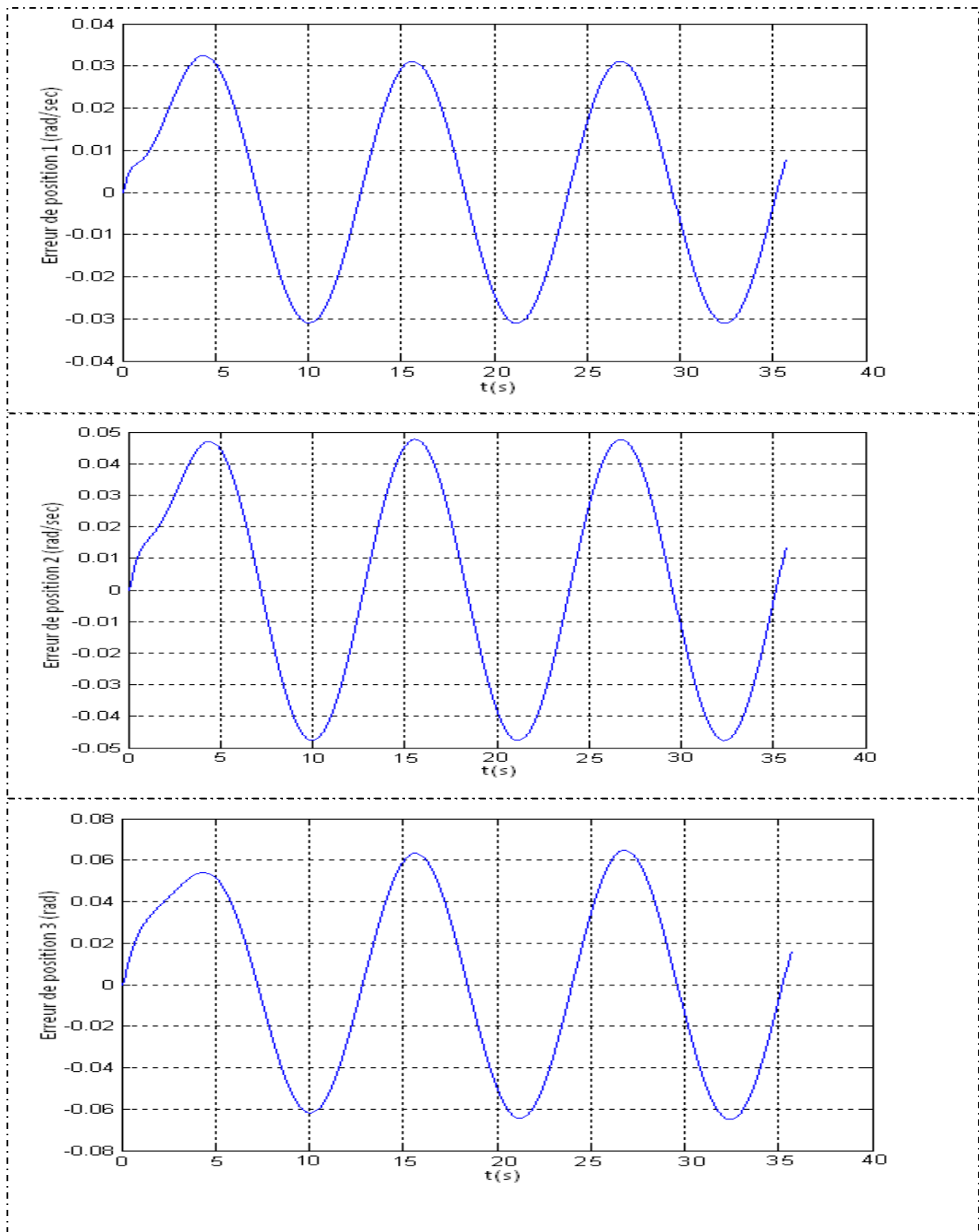


Figure IV-9 : Erreur de positions articulaires.

La forme des résidus des deux sites (maitre/esclave) pour ce cas de fonctionnement (sans défauts), sont comme les illustrent les figures (IV-10), (IV-11). La figure (IV-12) expose le comportement des résidus par rapport au seuil préfinis.

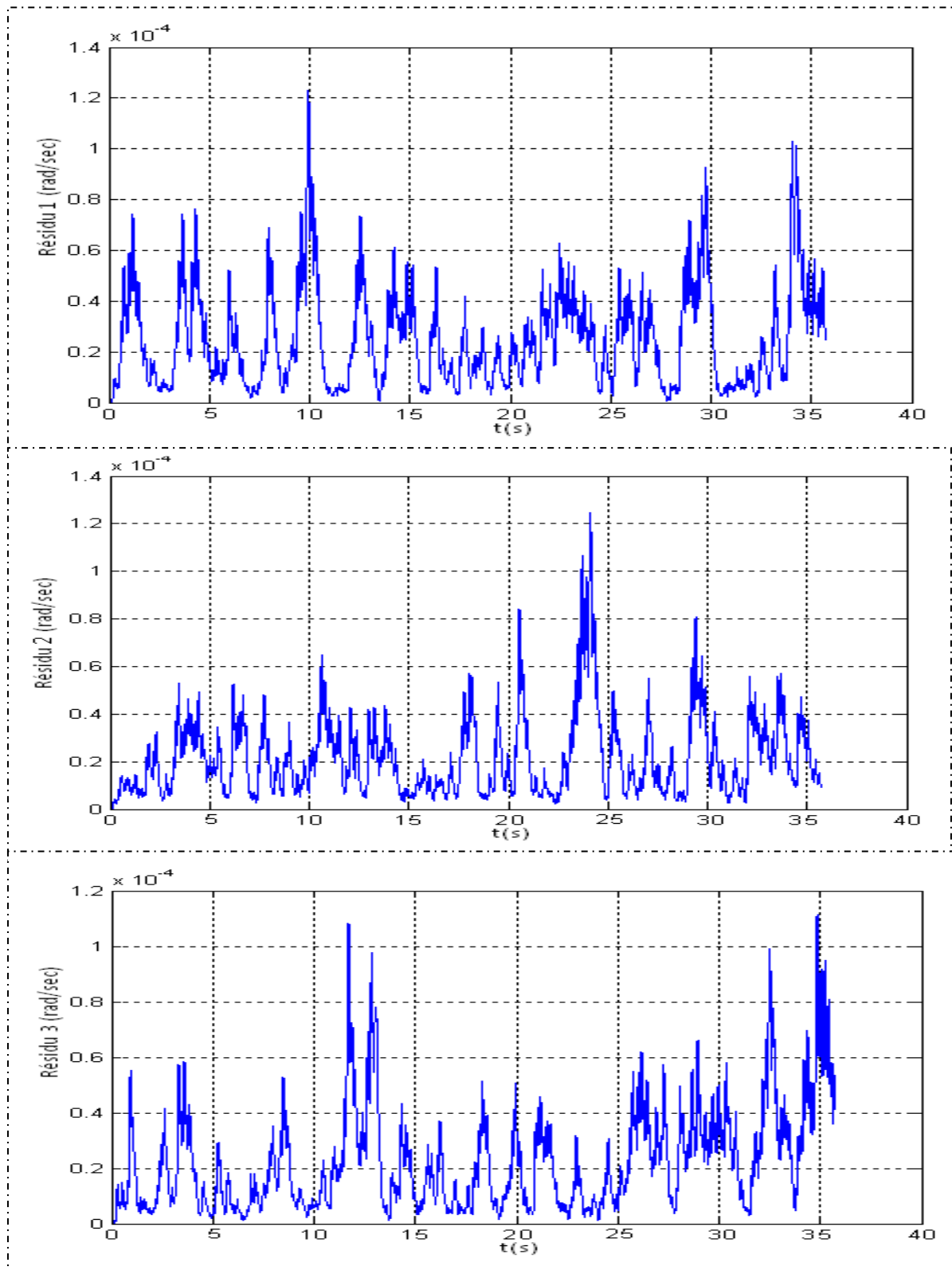


Figure IV-10 : Les allures de résidus coté maitre.

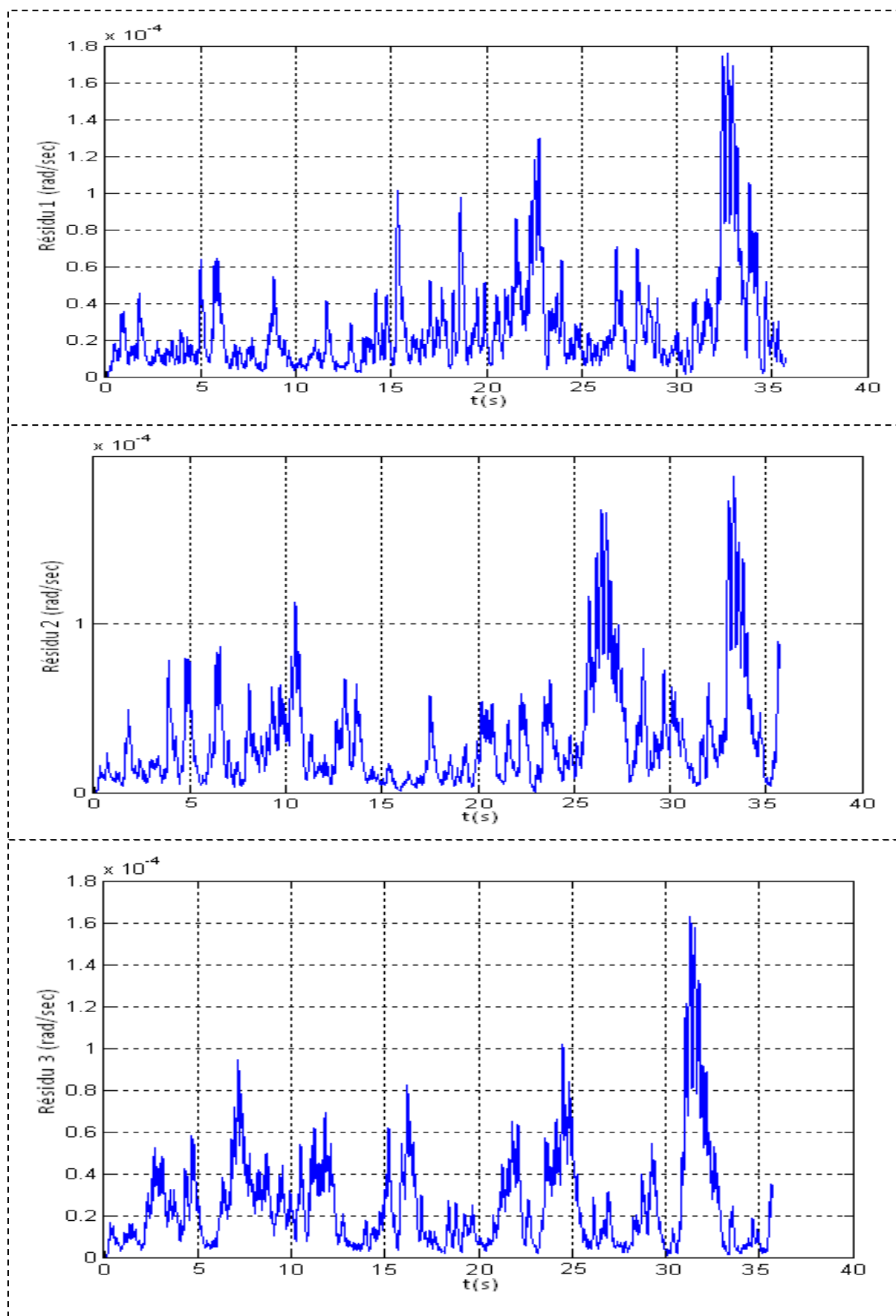


Figure IV-11 : Représentation des résidus côté esclave.

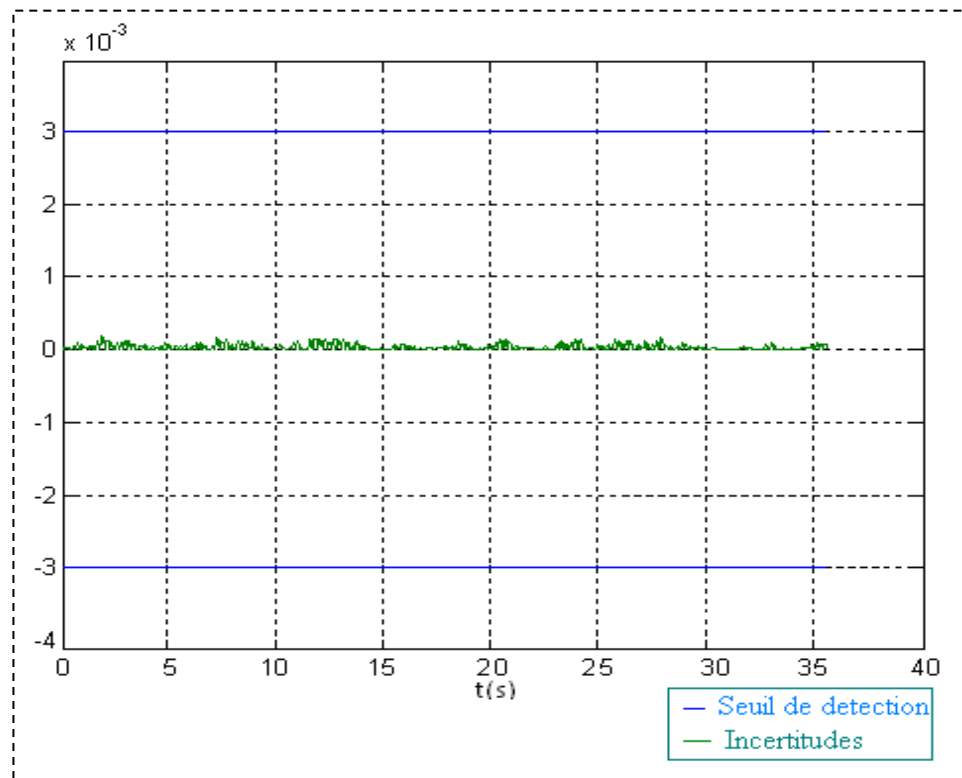


Figure IV-12 : Représentation de seuil et l'allure des incertitudes.

➤ **Interprétation des résultats :**

Les figures (IV-7), (IV-8), (IV-9), (IV-10) et (IV-11) représentent le cas de fonctionnement du système en absence de défauts. Dont nous notons que l'écart type entre les positions des deux robots est très faible (d'environ de 6%) et que les positions et les vitesses articulaires du bras esclave suivent parfaitement celles du bras maître. Ces erreurs sont dues, d'une part au non connaissance du modèle précis des incertitudes de modélisation et d'autre part au choix de type du contrôleur de la boucle de compensation de retard de transmission.

Nous pouvons constater aussi, que la présence des incertitudes de modélisation influe sur le comportement des résidus, dont leurs valeurs s'écartent légèrement de zéro, sans modifier les performances du système de régulation. Comme ce sont de faibles valeurs sont négligeables en les comparants au seuil prédéfini (voir la figure .IV-12). En excluant en toute évidence la possibilité de signalisation de fausses alarmes. Par conséquent, non seulement, les objectifs d'imitation esclave- maître sont maintenus, mais aussi la robustesse de la commande est assurée.

IV – 5 Fonctionnement du système suite à de défauts actionneurs

Au niveau du maître:

Les courbes représentant les formes des résidus du robot maître, lors d'apparition de défauts de type actionneurs au niveau de sa troisième articulation à l'instant $t=11$ sec, sont données sur la figure suivante :

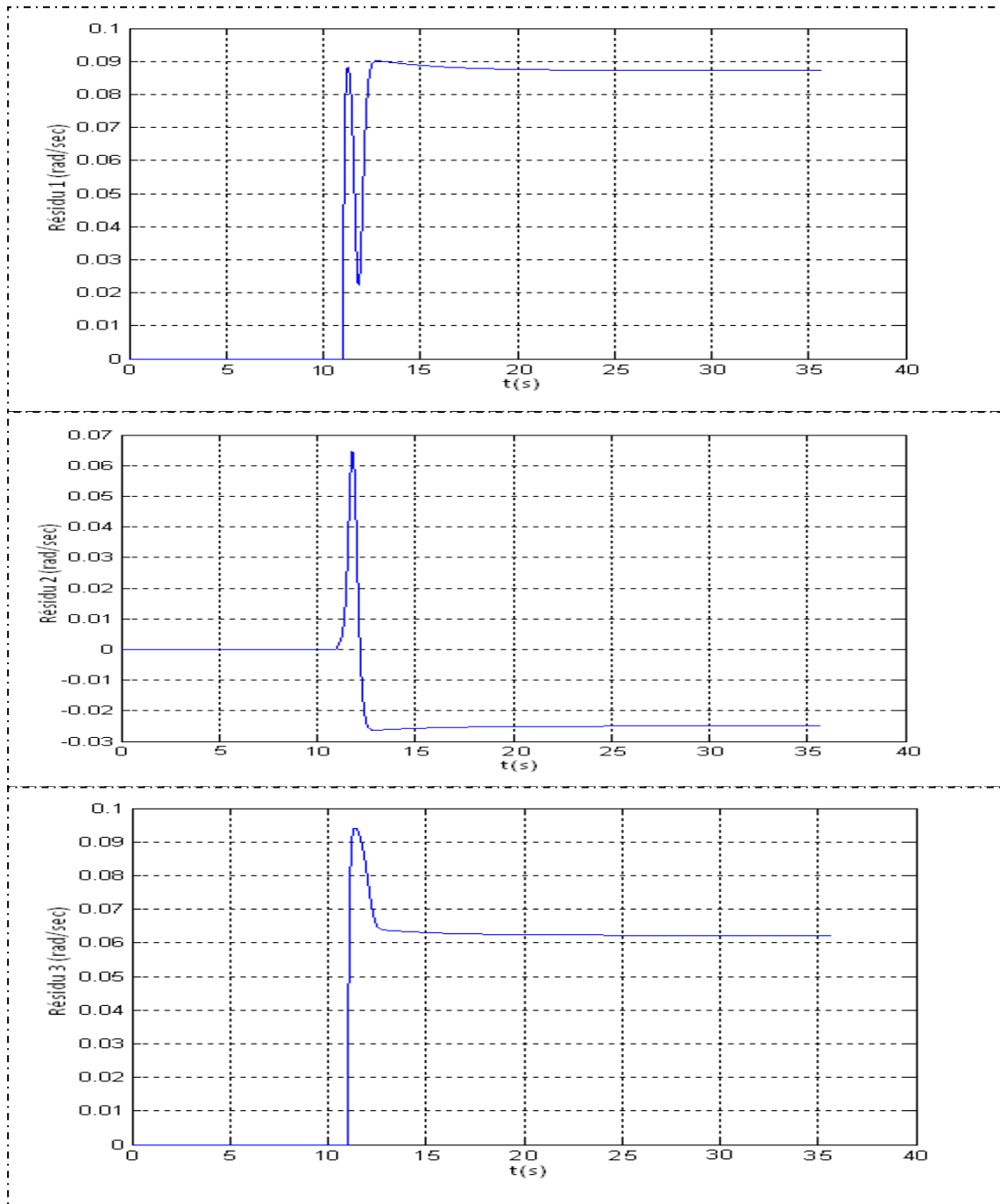


Figure IV-13 : Les résidus coté du robot maître : Apparition de défauts actionneurs à $t = 11$ sec.

La figure (IV-14) illustre l'influence d'apparition de défauts à l'instant $t = 11$ sec au niveau du robot maitre, sur le comportement des résidus du robot esclave.

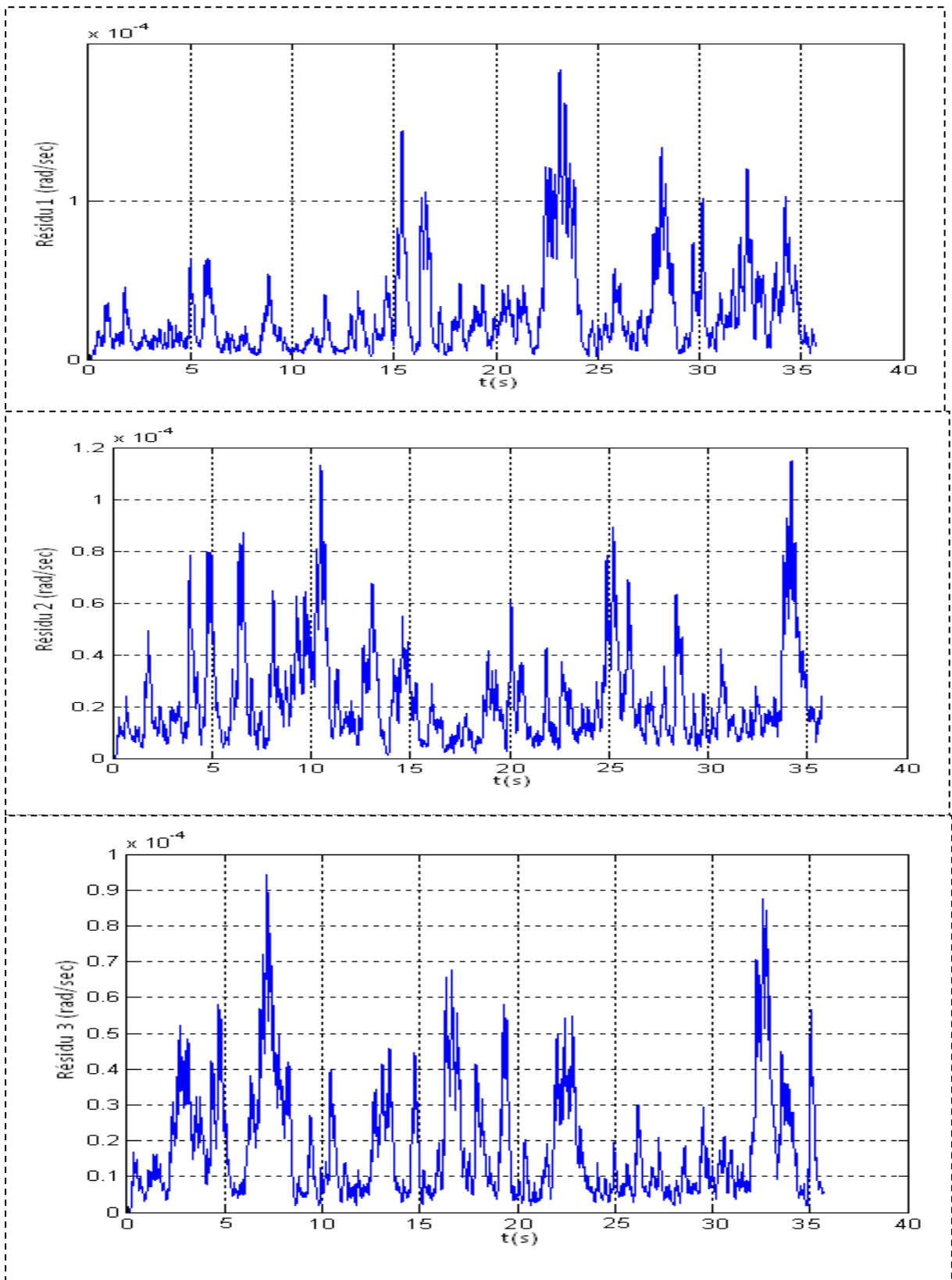


Figure IV-14: Les résidus coté esclave : Apparition de défauts actionneurs au niveau du maitre à $t = 11$ sec.

➤ **Au niveau d'esclave:**

Dans le cas d'apparition de défauts de type actionneurs au niveau de la troisième articulation du robot esclave, à $t = 11$ sec, le comportement des résidus de ce derniers est donné sur la figure suivante :

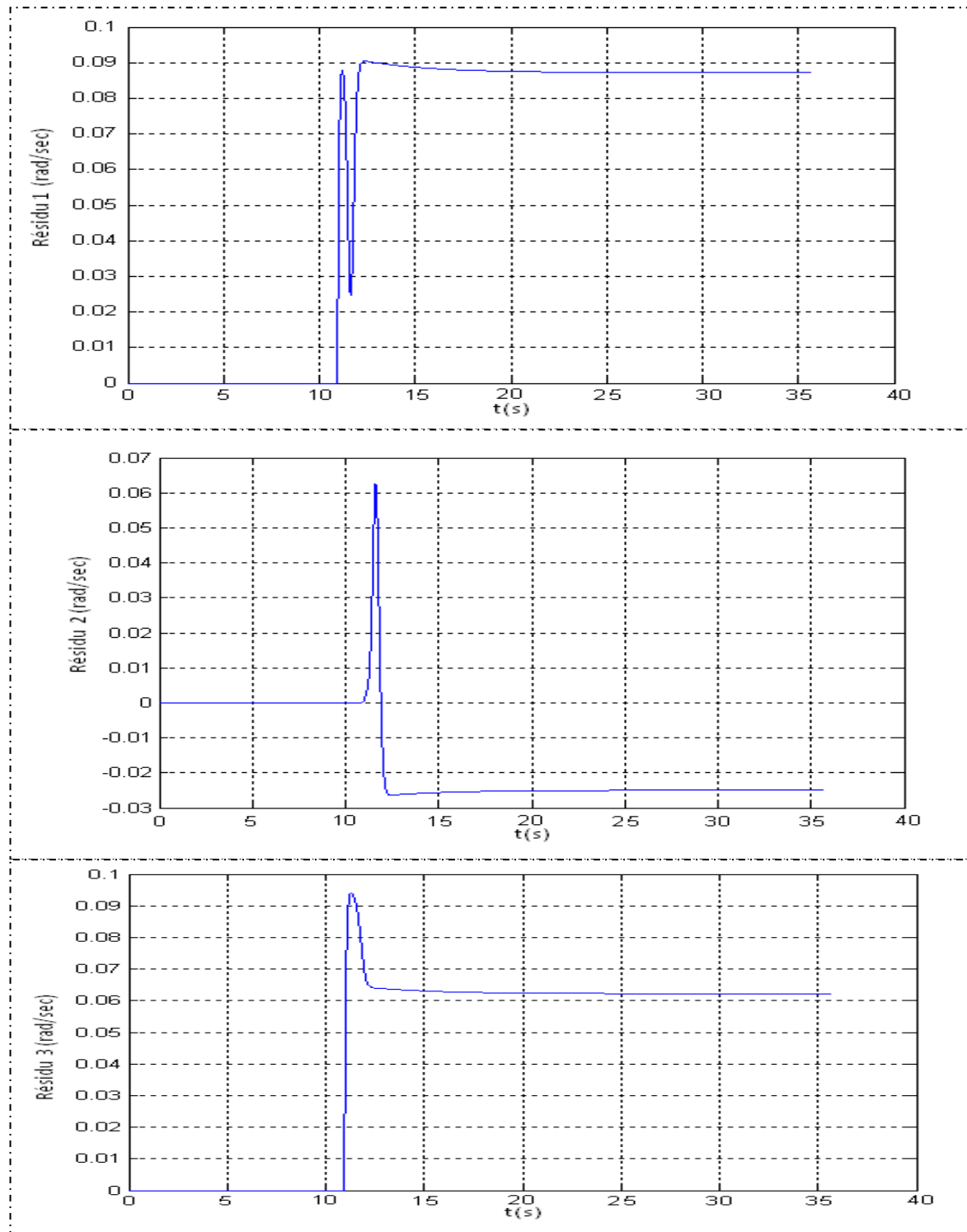


Figure IV-15 : Les résidus coté esclave : Apparition de défauts actionneurs à $t = 11$ sec.

La figure (IV-16) illustre l'influence d'apparition de défauts de type actionneurs à l'instant $t = 11$ sec au niveau du robot esclave, sur le comportement des résidus du robot esclave.

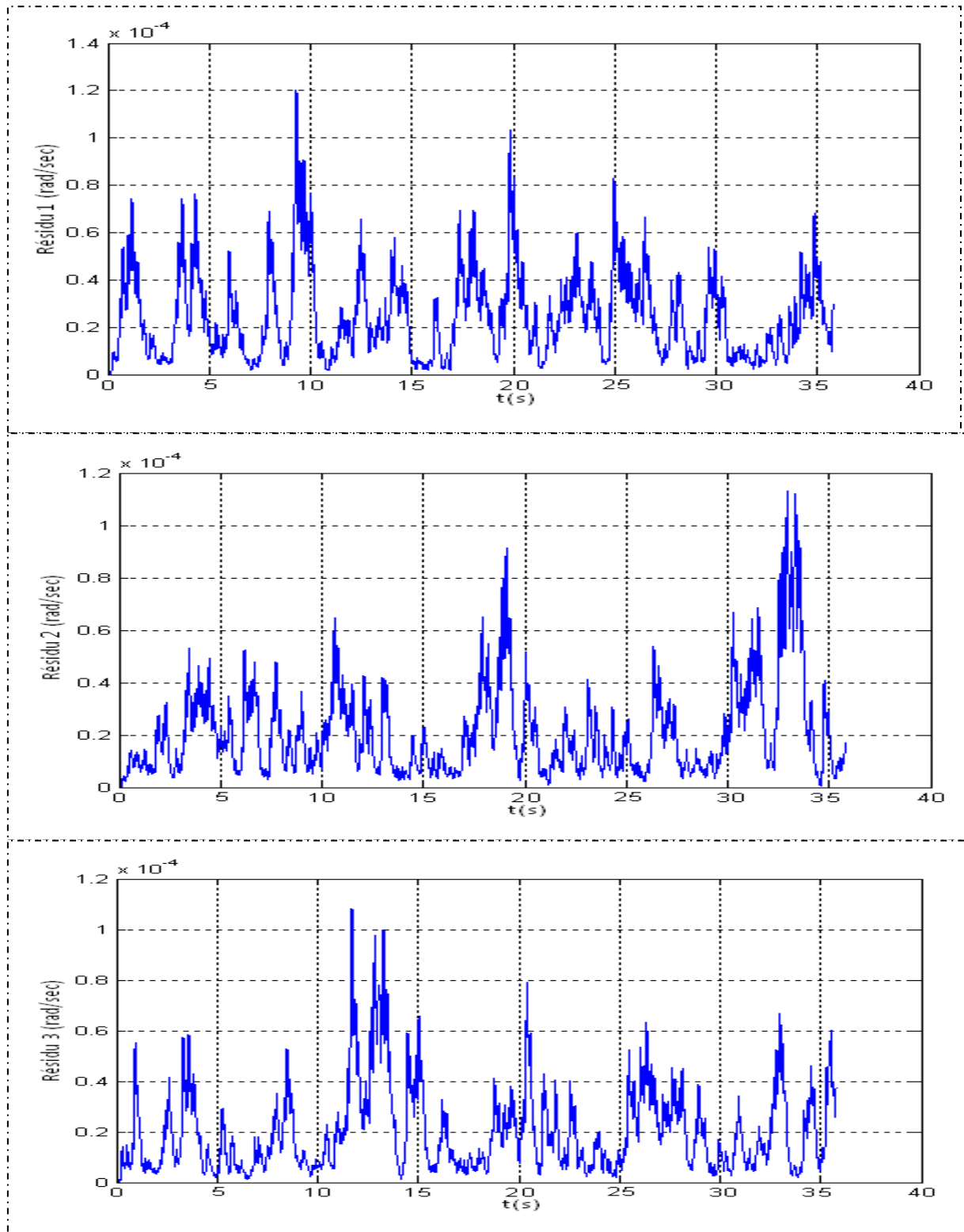


Figure IV-16 : Les résidus coté maître : Apparition de défauts actionneurs au niveau du Robot esclave à $t= 11$ sec.

Les tracés de la figure qui suit, illustrent les différentes courbes décrivant le comportement des positions durant cette simulation.

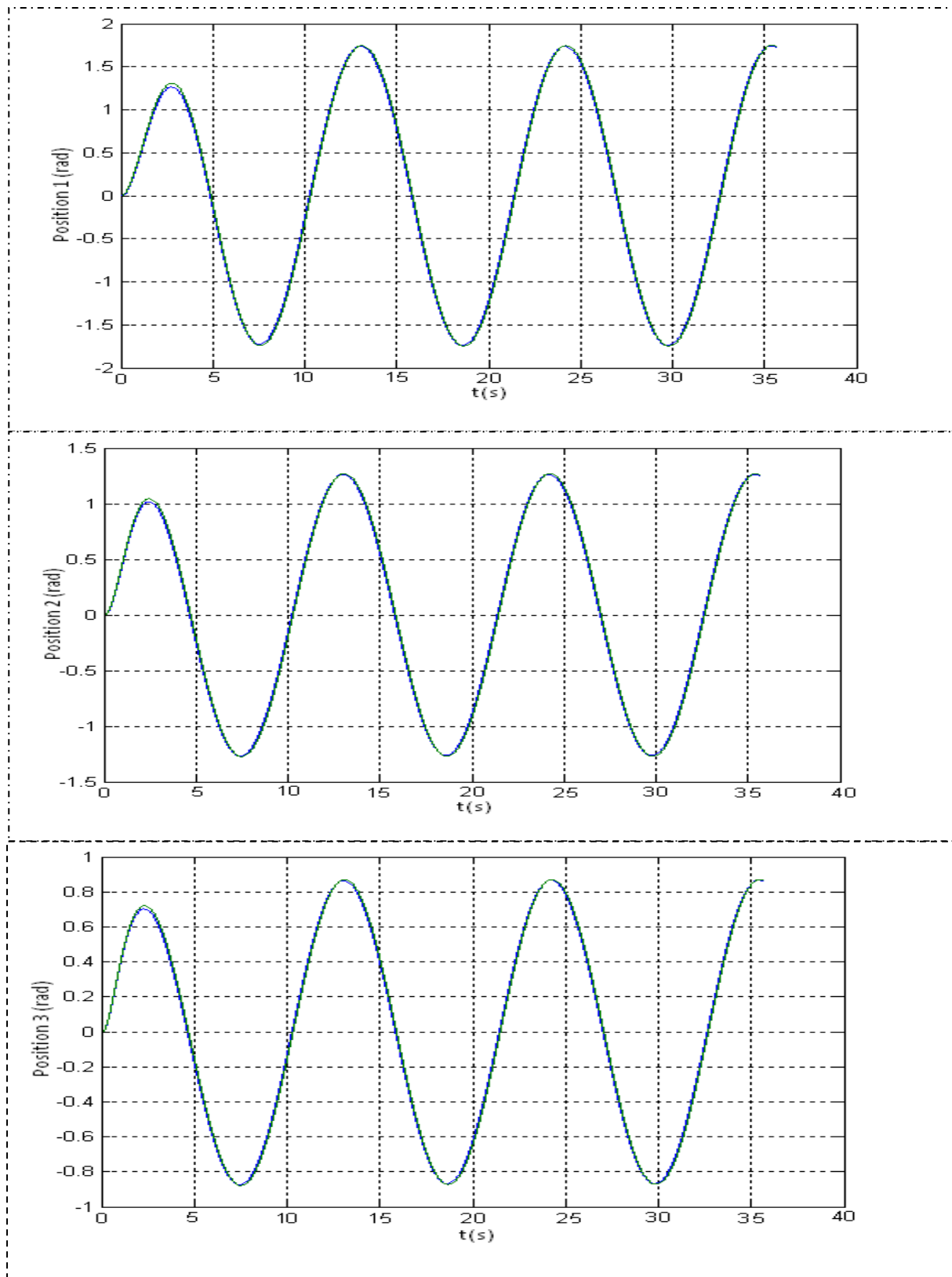


Figure IV-17 : Positions articulaires (maitre /esclave) : Apparition de défauts actionneurs à $t = 11$ sec.

➤ **Interprétation des résultats :**

Les figures (IV-13) et (IV-14), illustrent respectivement le comportement des résidus du côté de robot maître et du côté de robot esclave dans le cas d'apparition de défauts de type actionneurs au niveau du robot maître et les figure (IV-15) et (IV-16) exposent respectivement l'allure des résidus du côté esclave et du côté maître, dans le cas d'apparition de défauts de type actionneurs au niveau du robot esclave. Dont pour les deux cas de simulation, nous constatons que les valeurs des résidus du robot affecté par la défiance, s'écartent notablement de zéro à l'instant $t = 11$ sec, traduisant ainsi l'apparition de défauts actionneurs; sans aucune détection d'anomalie dans le fonctionnement du robot sain (voire figure (IV-14), (IV-16)). Néanmoins, nous constatons aussi des légères modifications dans le comportement des résidus de ce dernier, en le comparant avec les résultats obtenues dans le cas de fonctionnement du système sans défauts. Nous imputons ces modifications, à la prise en considération des anomalies détectées au niveau du robot affecté par la défiance, par le contrôleur assurant la reconfiguration de la loi de commande du robot sain.

Avec l'utilisation de la stratégie FTC, nous remarquons d'après la figure (IV-17), que malgré l'apparition des défauts de type actionneurs, la structure maintient ses performances.

IV – 6 Fonctionnement du système suite à des défauts composants

Les figures suivantes illustrent le comportement des positions et des vitesses articulaires et les formes des résidus dans le cas d'apparition de défauts de type composants dans les deux sites.

➤ Au niveau du maître:

Les tracés de la figure (IV-18), montrent le comportement des résidus du robot maître dans le cas d'apparition de défauts de type composants à l'instant $t = 11$ sec, au niveau de la troisième articulation de ce dernier.

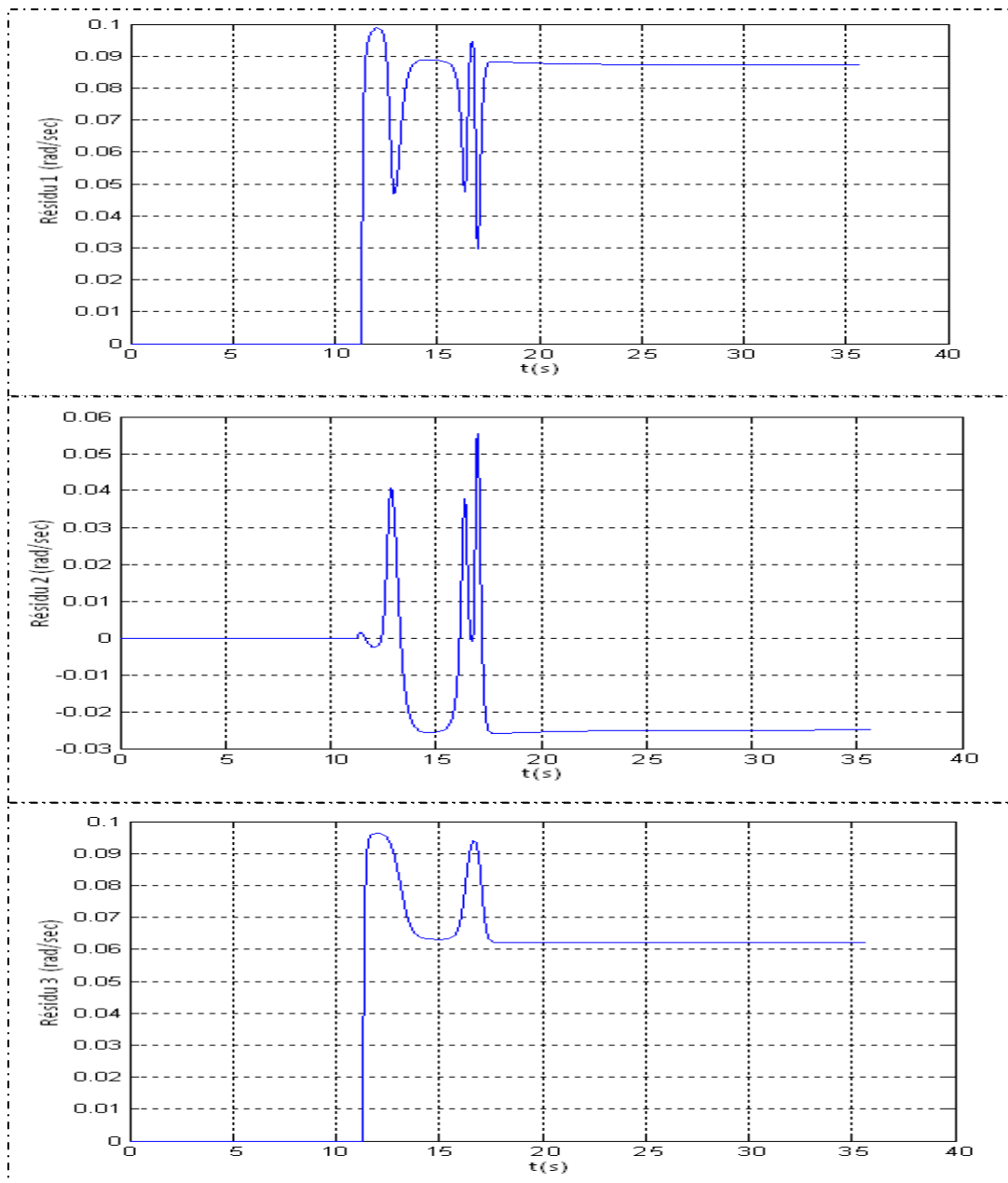


Figure IV-18 : Les résidus coté maître : Apparition de défauts composants à $t = 11$ sec.

La figure (IV-19) montre Les tracés du comportement des résidus du robot esclave durant cette simulation.

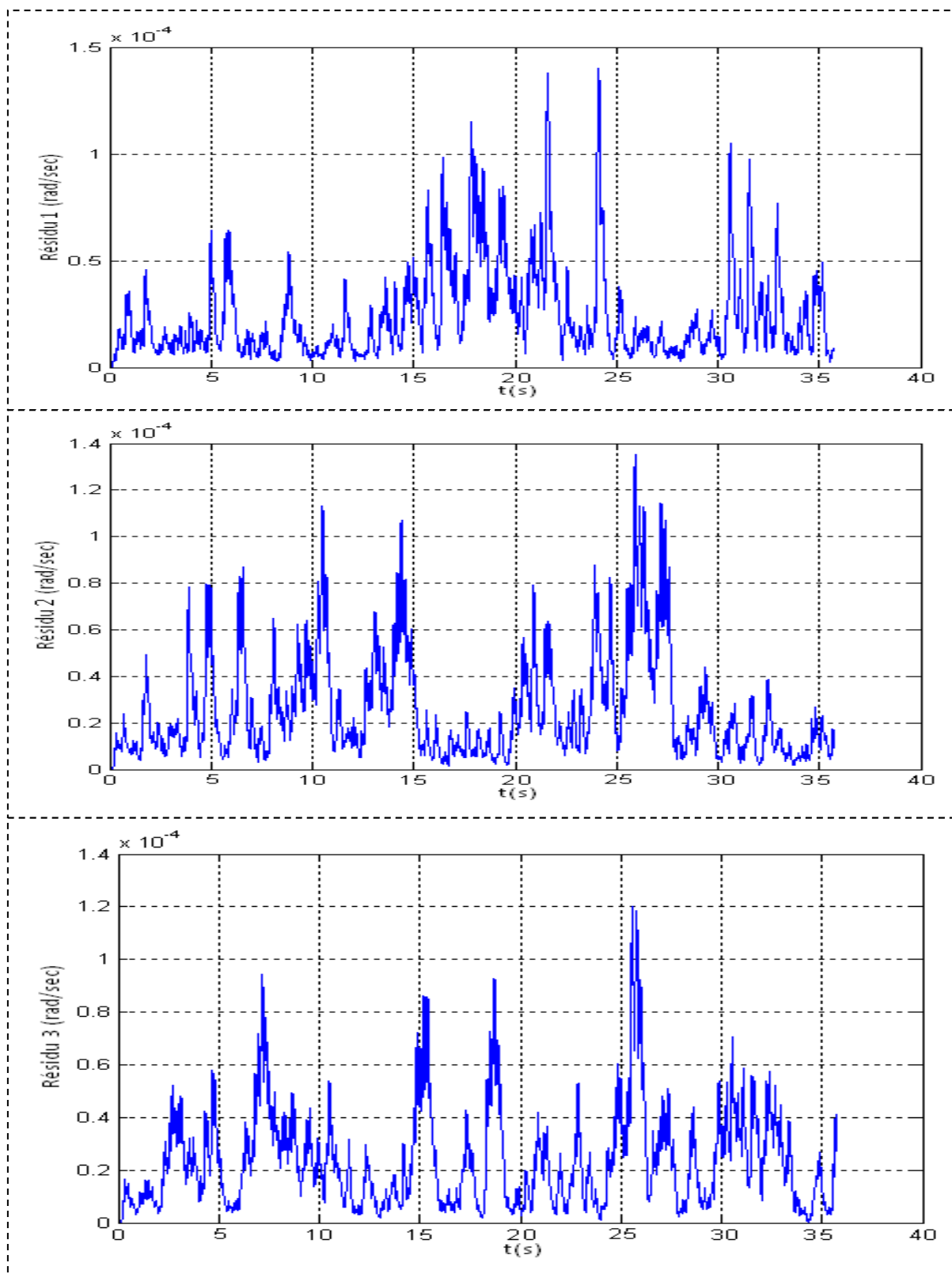


Figure IV-19: Les résidus coté esclave : Apparition de défauts composants au niveau du robot maître à $t = 11$ sec.

➤ **Au niveau d'esclave :**

Les tracés de la figure (IV-20), montrent le comportement des résidus du robot maitre dans le cas d'apparition de défauts de type composants à l' instant $t = 11$ sec, au niveau de la troisième articulation de ce dernier.

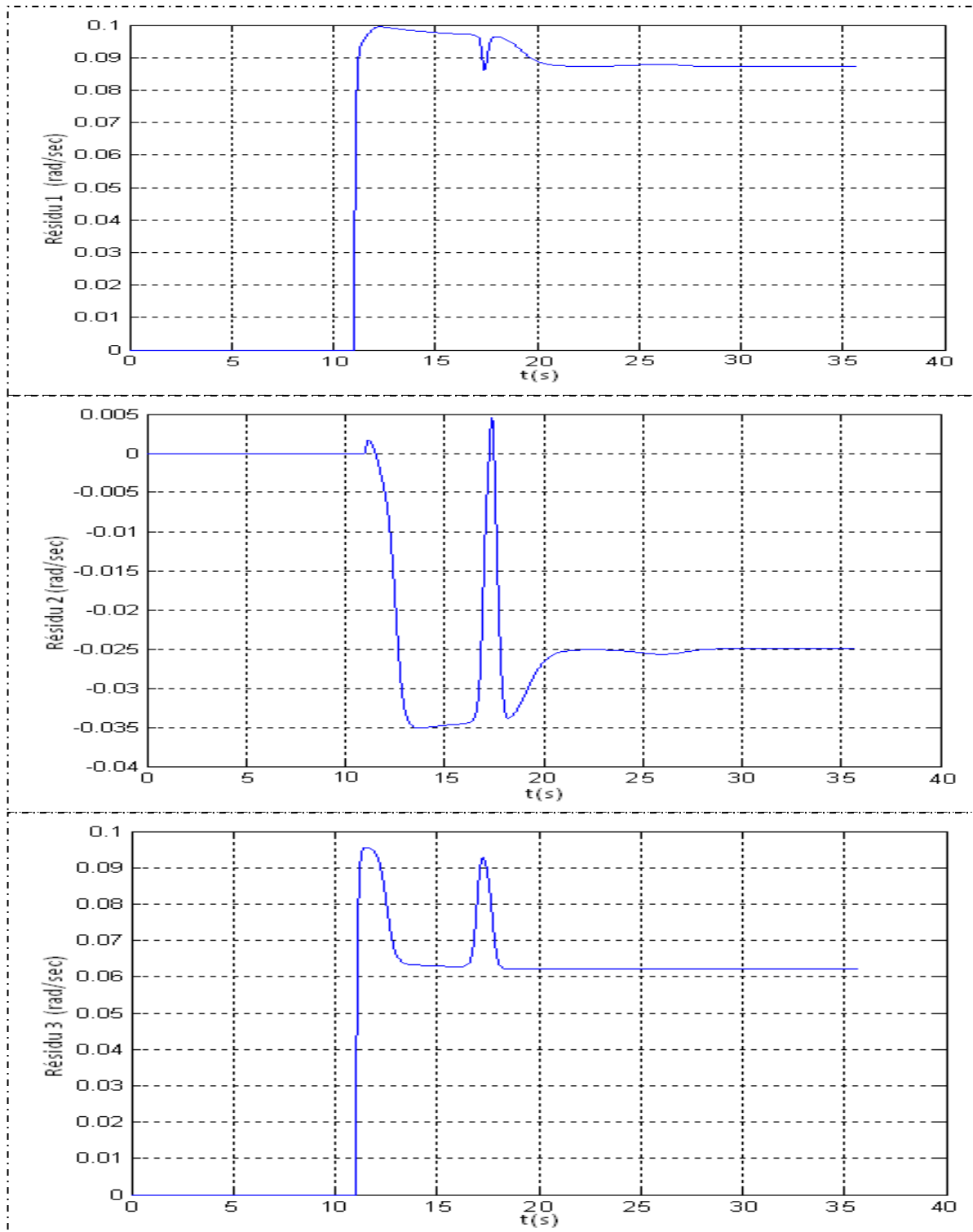


Figure IV-20 : Les résidus coté esclave : Apparition de défauts composants à $t = 11$ sec.

La figure (IV-21) montre Les tracés du comportement des résidus du robot esclave durant cette simulation.

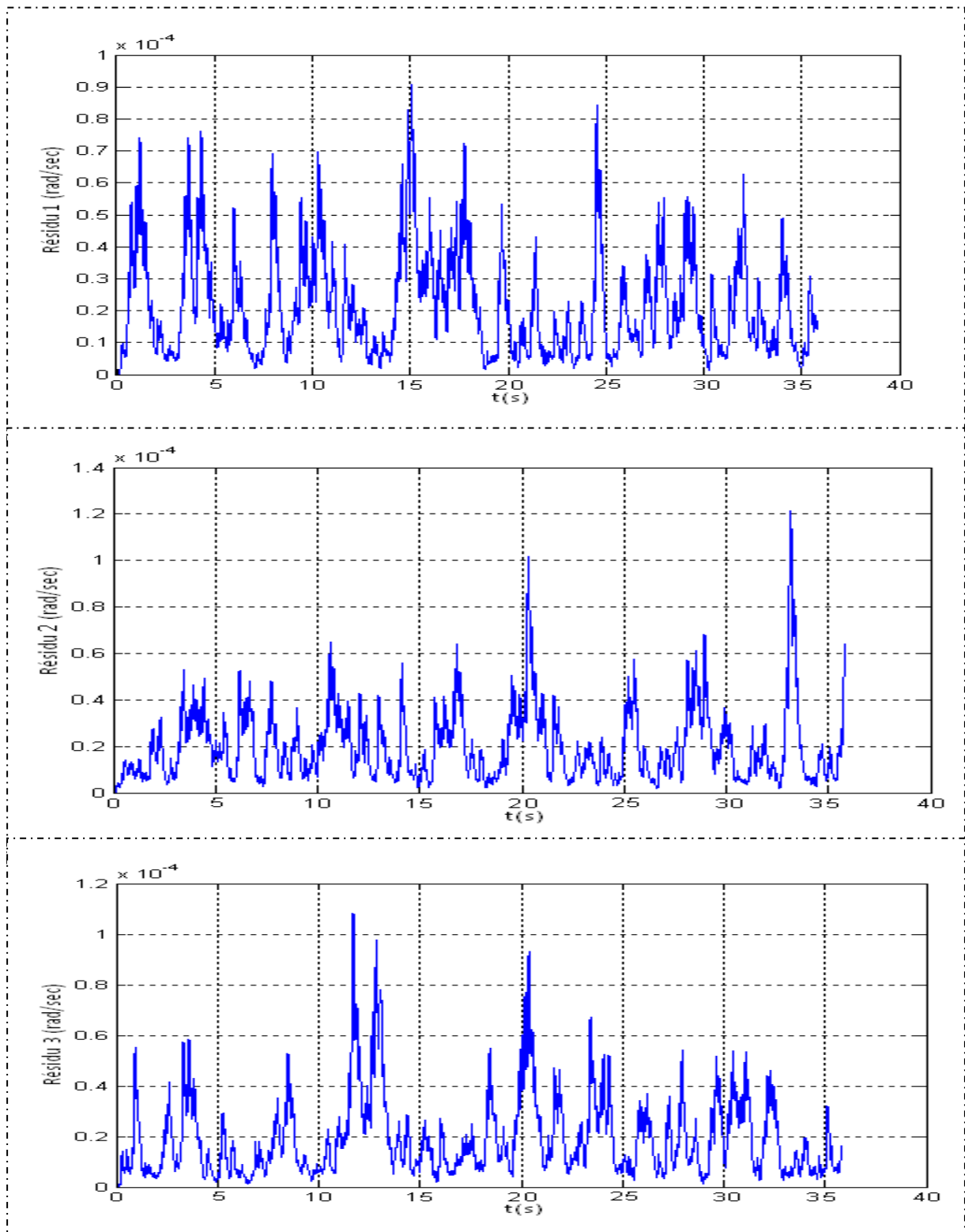


Figure IV-21: Les résidus coté maître : Apparition de défauts composants au niveau du robot esclave à $t = 11$ sec.

Les différentes courbes décrivant le comportement des positions durant cette simulation, sont données sur la figure suivante :

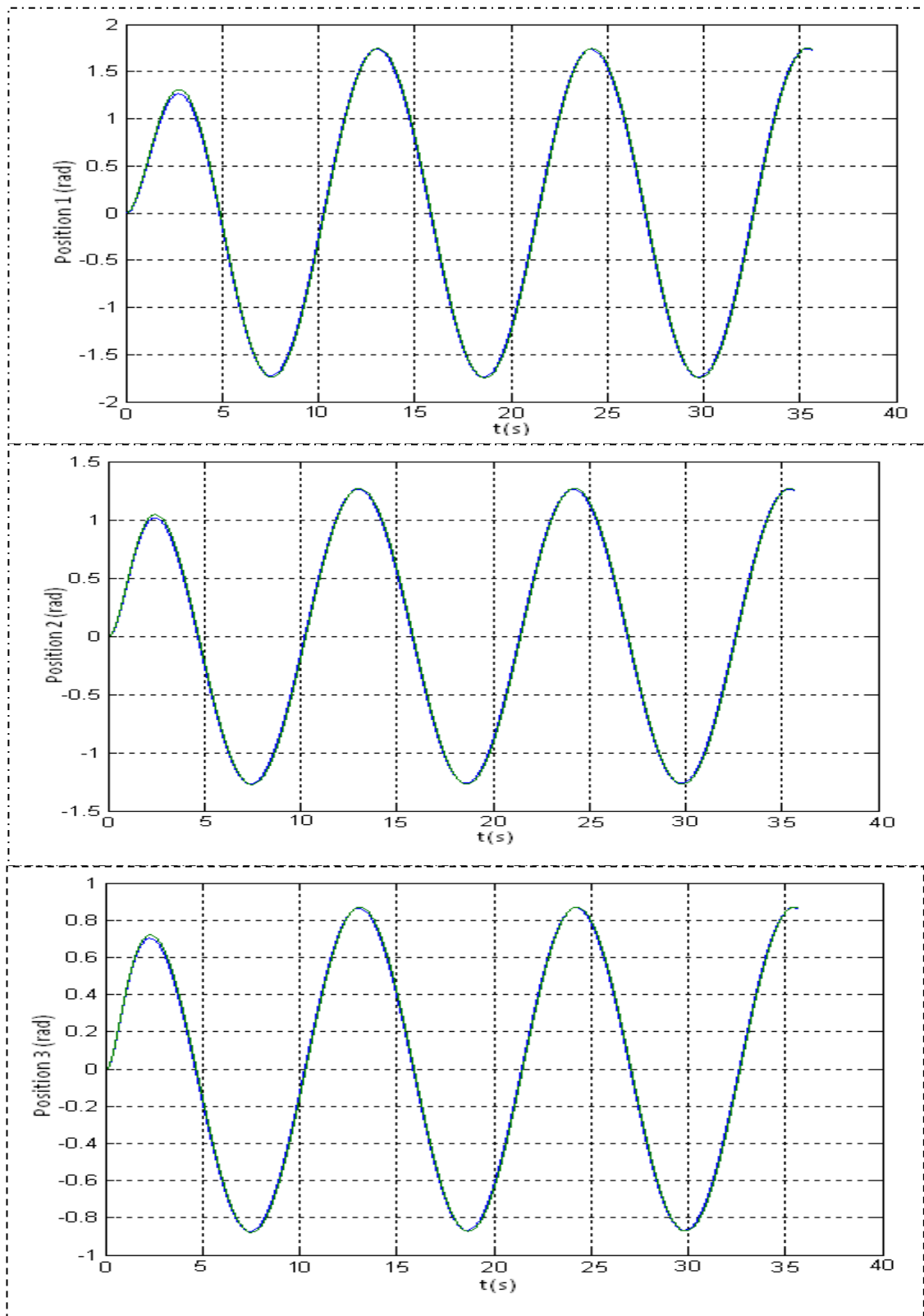


Figure IV-22 : Positions articulaires (maitre /esclave) : Apparition de défauts composants à $t = 11$ sec.



Interprétation des résultats

Les figures (IV-18) et (IV-19), exposèrent respectivement le comportement des résidus du côté de robot maitre et du côté de robot esclave dans le cas d'apparition de défauts de type composants au niveau du robot maitre et les figure (IV-20) et (IV-21) exposent respectivement l'allure des résidus du côté esclave et du côté maitre , dans le cas d'apparition de défauts de type composants au niveau du robot esclave. La figure (IV-22) illustre le comportement des positions articulaires des deux robots. Des résultats similaires au cas précédent sont obtenus, à savoir, les résidus s'éloignent de zéro que dans le fonctionnement du robot affecté par la défiance et les performances de la structure sont maintenues.

IV-7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé les résultats de simulation effectuée sous l'environnement Matlab/Simulink, afin de tester les performances d'une commande tolérante aux défauts à un bras manipulateur d'un robot SCARA téléopéré.

Les différentes simulations effectuées montrent que l'approche de la FTC adopté permet de compenser les effets des défauts sur les performances du système. Dont le module de surveillance détecte et localise les défauts avec une grande efficacité et le mécanisme de reconfiguration bascule bien d'une loi de commande vers une autre.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le travail de la recherche présenté concerne un des domaines les plus intéressants et d'actualité de la robotique, à savoir la téléopération et la résolution des problèmes, qui peuvent surgir lors d'une ou plusieurs défaillances lors d'accomplissement d'une tâche.

On a utilisé une architecture de téléopération à quatre canaux de communication. Cette architecture utilise les signaux de la position et de la force. Cette dernière est très souhaitable pour obtenir une bonne transparence avec une certaine instabilité du système dans les conditions idéales. Afin d'améliorer les performances de la commande à distance des systèmes, des solutions ont été envisagées dans le but de stabilisation du système, à savoir les conditions sur la passivité du système et l'élimination du retard de transmission.

On a aussi appliqué des approches qui permettent la reconfiguration de la loi de commande en temps réel garantissant au mieux les performances du système. On pourra ainsi doter le système d'une plus grande autonomie pour de tels systèmes robotisés téléopérés.

Comme perspectives pour un travail de recherche futur, on suggère que des modèles plus précis concernant les bras manipulateurs maître-esclave. Les incertitudes de modalisations peuvent être minimisées et correctement estimés. Les améliorations qu'on peut apporter afin d'atteindre le stade d'une imitation totale (téléprésence), et d'utiliser des techniques d'intelligence artificielle mixtes neuro-floue pour l'estimation des résidus et la prise de décision. Ces techniques peuvent être utilisées pour l'élaboration des différents contrôleurs que comprend cette conception et application d'autre procédure de surveillance (diagnostic) : Analyse de la composante principale.

On souhaite que ce mémoire servira comme plateforme pour des travaux de recherche futurs en robotique en général et dans la sécurité de fonctionnement des robots manipulateurs téléopérés en particulier.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] K. Astrom, Albertos P., Blanke M., Isidori A., Schaufelberger W., Sanz R.,
« Control of Complex, Systems ». Springer Verlag, 2000.
- [2] Blanke M., Kinnaert M., Lunze M. and Staroswiecki M. « Diagnosis and fault
tolerant control ». Springer, New York, 2003.
- [03] Abdelkader AKHENAK. « Conception d'observateurs par approche multi modèle :
Application au diagnostic ». Doctorat de l'Institut National polytechnique de Lorraine,
décembre 2004.
- [04] HOKAYEM, P.F et Spong, M.W., « Bilateral téléopération: An historical survey:
Automatica », 42(12): 2035 -2057, 2006.
- [05] A. Kherddar et P. Coiffet, éditeurs. « Téléopération et télé robotique ». Hermas 2002.
- [06] Hammafard B., « A design framework for téléopération with kinesthetic feedback ».
IEEE Trans., on Robotics and Automation, 5(4) 426-434, 1989.
- [07] Hammafard B., « Stability and performance trade offs in bilateral
telemanipulation ». Proc., of the IEEE Int., Conf., on Robotics and Automation
(ICRA '89), pages 1764 – 1767, Scottsdale, AZ, USA,1989.
- [08] Barbe L., BAYLE B., de Mthelin M., et GRANGI A., « Invivo model estimation
and haptic characterization of needle insertions ». The International Journal of
Robotics Research, 2007.
- [09] Anderson R., J., et Spong M.,W., « Bilateral control of teleoperators with time delay ».
IEEE Trans., on Automatic Control, 34(5) 494 – 501, 1989 .
- [10] Micaelli A., « Téléopération et télé robotique, chapitre Asservissement et lois de couplage
en téléopération ». Hermes, 2002.
- [11] Adams R., et Hannaford B., « Stable Haptic Interaction with virtual Environnement ».
IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 15, no. 3, page 465, 1999.
- [12] Hastrudi- Zaad K., « Implentation and evaluation of stable bilateral téléopération
Control architectures for en hanced téléprésence ». Thèse de doctorat, université de

- colombie Britannique, Canada, 2000.
- [13] Bernard BAYLE, « Contribution à la commande et à la conception des systèmes de manipulation : Application en Robotique médicale ».
- [14] Raju G., verghese G., et Sheridan T.,B., « Design Issues in 2- port Network Models of Bilateral Remote Manipulation » IEEE Inter., conference on Robotics and Automation, pages 1316- 1321, Scottsdale, Etats- Unis, 1989.
- [15] Flatau C.,R., « development of servo-manipulators for high Energy accelerators requirement », Proc.,13th R.S.T.D. Conf., P., 154-156, 1969.
- [16] Lawrance A., « Stability and transparency in bilateral téléopération ». IEEE Trans., on Robotics and Automation, 9(5). P.,424-637, 1993.
- [17] Hashtrudi-Zaad K., et Salcudean S., E., « On the use of local force feedback for transparent téléopération ». Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, Michigan, mai 1999.
- [18] Zaad K., H., et SALLUDEAN S., E., « Transparency in time delayed systems and the effet of local force feedback for transparent téléopération ».IEEE Trans., on Robotics and Automation, 18(1), 2002.
- [19] Gersem G., De., « Kinaesthetic feedback and Emhanced Sensitivity in Robotic Endoscopie telesurgery ». Thèse de doctorat, Université cathodolique le leuven, 2005.
- [20] Yves BRIERE. « Téléopération en presence de retard : le comcept de téléopération Hybride Duale ». Thèse de doctorat, centre d'études et de recherche de toulouse, departement d'Automatique, 1994.
- [21] Vertut J., Coiffet P., «Teleoperation and Robotics Evolution and Development Robot », Technology Volume 3A., Kogan ,Pages 5-9, 1985.
- [22] Raju G., J., « Operator Adjustable Impedence in bilateral, Remote manipulation ». PHD Thesis, Messachussetts Institu of technology combridge, Messachussetts 02139, 1988.
- [23] Bobgan, P., M., Kazerooni H., « Achivevable Dynamics Performance in Telerobotics Systèms » Proceedings of the IEEE Intrenational Conference on Robotics and Automation, Sacramento, California, April 1991.

- [24] Ferrell W., R., « Remote manipulation with transmission delay », IEEE Transaction on Human factor in Electronic, HFE, vol.6, P24, 1965.
- [25] Smith O.,J., M., « Close control of loops with dead times », chen Eng., Prog., Trans., 53,5, p217-219, 1957.
- [26] MEGUELLATI Mohamed, « Commande à distance d'un bras manipulateur à un seule degré de liberté avec retour de force en présence d'un temps de retard contant ». Mémoire de magister en électronique, Robotique, Université de Batna, 2007.
- [27] Palmor Z., J., « Stability properties of Smith dead-time compensator controller ». Int., J., Control, 32(6) :937–949, 1980.
- [28] Walid ZARRAD. « Téléopération avec retour d'effort pour la chirurgie mini inverse ». These de doctorat, Université MONTPELLIER II, Décembre 2007.
- [29] Isermann R., « Process fault detection based on modelling and estimation methodes : a survey ». Automation, vol 20, n°4, p., 387- 404, 1984.
- [30] Isermann R., « Spervision, fault detection and fault diagnosis methods an introduction », Control Engineering Practice, vol 5,n°5, , pp.639 – 652, 1997.
- [31] Mickael Rodrigues, « Diagnostic et commande active aux défauts appliqués aux systèmes décrits par des multi-modèles linéaires ». Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy1. 2005.
- [32] Rosario T., « Commande et diagnostic des systèmes dynamiques modélisation, analyse, commande par PID et par retour d'état ». Edition Ellipses. 2005.
- [33] Mohammed OUDGHIRI, « Commande multi-modèle tolérante aux défauts : Application au contrôle de la dynamique d'un véhicule automobile » Thèse de Doctorat. Université de PICCARDITE Jules verne, 1992.
- [34] Wisama Khalil et Etienne Dombre. « Modélisation identification et commande des Robots » 2^{ième} édition revue et augmentée. Hermes Science Publication Paris, 1988.

- [35] Kmelnisky V.,M ., « Automated on- line Diagnosis and control configuration In Robotic Systems Using model based analytical redundancy », Master of Science in Mechanical Engineering, Worcester Polytechnic Institute, Janvier 2002.
- [36] OURHLENT S., « Diagnostic de pannes dans les systèmes Robotises ». Mémoire de magister en électronique, Robotique, Université de Batna, Juin 2009.
- [37] Patton R.,J., « Fault Detection and Diagnosis in aerospace Systems using Analytical Redundancy », computing and Control Engineering Journal, vol., 2, Issu 3,pp.127-136, 1991.
- [38] Lootsma T., F., « Observer- based Fault Detection and Isolation for nonlinear Systems » These de PHD, Department of Control Engineering, Aalborg University, Denmark, 2001.
- [39] ZEMOURI M., R., « Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques ». Thèse de Doctorat de l'université de franche-comté, Ecole Doctorat Sciences Physique pour l'ingénieur et Microtechniques, 2003.
- [40] Willskey A., S., « A Survey of design methods for failure detection in dynamic systems ».Automatica, vol., 12, pp 601-611, 1976.
- [41] Clark R. N. et al. « Detection instrument malfunctions in Control Systems », IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems, vol., AES -11, 1989.
- [42] Frank P., M., « Fault diagnostic in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy – A survey and some new results », Automatica, vol 26, N°3, pp 459-474, 1990.
- [43] Gertler J., J., « Fault Detection and diagnosis in Engineering systems », Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, Hong Kong 1998.

ANNEXE

A. Contrôleur à quatre canaux pour Téléopérateurs avec Admittance Maître et/ou esclave

Dans cette annexe, des architectures générales à quatre canaux de commande pour les types Impédance - Admittance, Admittance - Impédance et Admittance - Admittance des systèmes de téléopération sont présentés. En outre, la stabilité et les conditions de transparence suppose les temps de retards négligeables sont dérivés.

A.1- le type Impédance -Admittance de téléopérateurs :

La figure A.1 montre le schéma fonctionnel général d'un système de téléopération de type d'Impédance- Admittance est commandé par un contrôleur bilatéral à quatre canaux avec temps de retard T_d de communication . Puisque l'esclave est un dispositif Admittance, le bloc esclave - environnement « d » de la figure III.3 est utilisé. Par conséquence, des commandes de position sont reçues sur le côté esclave.

Ici, E_1 et E_3 dénotent l'alimentation progressive à distance, E_5 la position locale de retour, et E_s^{-1} les fonctions transfert rationnelles de la force progressive utilisées dans la loi de commande d'esclave :

$$V_{es} = -E_s V_s - E_s^{-1} F_s + E_2 e^{-sT_d} V_h + E_1^{-1} e^{-sT_d} F_h \quad (\text{A.1})$$

Notez que E_1 et E_s comme C_m et C_s sont des filtres de type Impédance. Après fermeture de la boucle de control, la dynamique du maître et l'esclave sont régis par :

$$(1 + E_s) V_s - E_s e^{-sT_d} V_h = E_1 e^{-sT_d} F_h - Y_{es} F_s \quad (\text{A.2})$$

Où $Y_{es} = Y_s + E_s^{-1}$ dénote la dynamique de l'esclave après la force de retour. Comme avant, pour analyser la stabilité et la performance du système, le M.S.N.

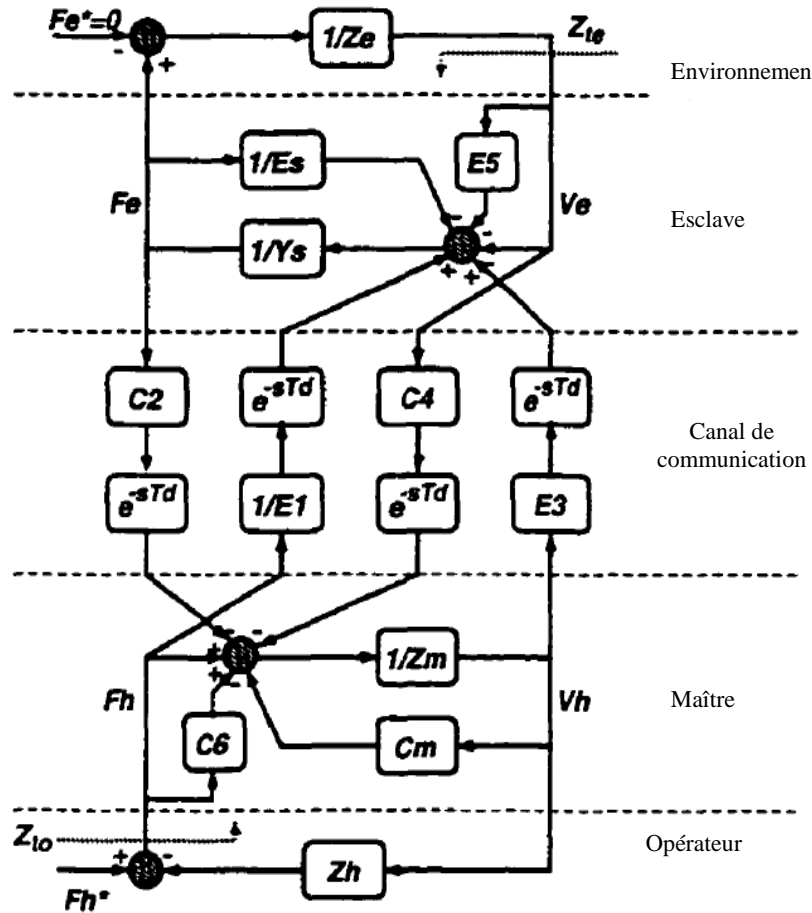


Figure A. 1: Schéma fonctionnel d'un type d'Impédance - Admittance du système de téléopération commandé par un contrôleur général à quatre canaux.

Les paramètres hybrides ont la forme :

$$h_{11} = \frac{(1 + E_5)Z_{cm} + E_5 C_4 e^{-2sT_d}}{(1 + E_5)(1 + C_6) - E_1^{-1} C_4 e^{-2sT_d}} \quad (\text{A.3})$$

$$h_{12} = \frac{C_2(1 + E_5)e^{-sT_d} - C_4 Y_{es} e^{-sT_d}}{(1 + E_5)(1 + C_6) - E_1^{-1} C_4 e^{-2sT_d}} \quad (\text{A.4})$$

$$h_{21} = -\frac{E_2(1 + C_6)e^{-sT_d} + E_1^{-1}Z_{cm}e^{-sT_d}}{(1 + E_5)(1 + C_6) - E_1^{-1}C_4e^{-2sT_d}} \quad (\text{A.5})$$

$$h_{22} = \frac{(1 + C_6)Y_{es} - E_1^{-1}C_2e^{-2sT_d}}{(1 + E_5)(1 + C_6) - E_1^{-1}C_4e^{-2sT_d}} \quad (\text{A.6})$$

Les Impédances transmises sont:

$$Z_{to} = \frac{[(1 + E_5)Z_{cm} + E_3C_4e^{-2sT_d}] + [Z_{cm}Y_{es} + C_2E_2e^{-2sT_d}]Z_s}{[(1 + E_5)(1 + C_6) - E_1^{-1}C_4e^{-2sT_d}] + [(1 + C_6)Y_{es} + E_1^{-1}C_2e^{-2sT_d}]Z_s} \quad (\text{A.7})$$

$$Z_{ts} = \frac{[(1 + E_5)Z_{cm} + E_3C_4e^{-2sT_d}] + [(1 + E_5)(1 + C_6) - E_1^{-1}C_4e^{-2sT_d}]Z_h}{[Z_{cm}Y_{es} + C_2E_2e^{-2sT_d}] + [(1 + C_6)Y_{es} + E_1^{-1}C_2e^{-2sT_d}]Z_h} \quad (\text{A.8})$$

Dans les conditions idéales ou en négliger le temps retard, le système de téléopération de type Impédance - Admittance devient parfaitement transparent, si et seulement si :

$$\begin{cases} E_1^{-1} = Y_{es} \\ C_2 = 1 + C_6 \\ E_2 = 1 + E_5 \\ C_4 = -Z_{cm} \end{cases} \quad \text{Ensemble de conditions d'une Impédance} \quad (\text{B.9})$$

Admittance parfaitement transparente

Et $(C_2, E_3) \neq (0, 0)$ est pris. Similairement au cas d'Impédance - Impédance, la dynamique du maître et d'esclave sont rejeté et le système est parfaitement transparent avec une stabilité marginale absolue. Note qu'à partir de (A.9), théoriquement, en remplaçant le paramètre de force de control C_6 du maître ou le paramètre de control E_5 d'esclave par (-1), il est possible d'éliminer la force du maître ou la position d'esclave, respectivement, et obtenu une architecture de commande à trois canaux transparent.

A.2- téléopérateurs de type Admittance –Impédance :



La figure A.2 montre le schéma fonctionnel général d'un système de téléopération de type Admittance -Impédance est commandé par un contrôleur bilatéral à quatre canaux. Comme pour le système précédent, le maître est un dispositif d'Admittance et les commandes de position sont Reçu sur le côté maître. Ici, E_2 et E_4^{-1} dénotent l'alimentation du maître à distance de position, E_6 le retour locale de position, et E_{sm}^{-1} les fonctions transfert rationnelle de la force local du maître utilisées dans la loi commande du maître :

$$V_{cm} = E_6 V_h - E_{sm}^{-1} F_h - E_2 e^{-sT_d} V_s - E_4^{-1} e^{-sT_d} F_s \quad (\text{A.10})$$

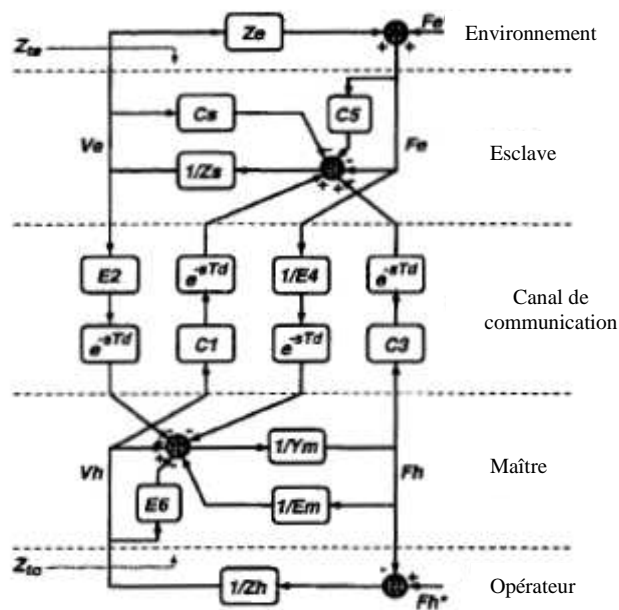


Figure A.2: Schéma fonctionnel d'un type d'Admittance - Impédance de système de téléopération commandé par un contrôleur de quatre canaux général.

La dynamique du système en circuit fermé du maître et de l'esclave est régit par :

$$(1 + E_6) V_h - E_2 e^{-sT_d} V_s = Y_{sm} F_h + E_4^{-1} e^{-sT_d} F_s \quad (\text{A.11})$$

Où $Y_{sm} = Y_m + E_{sm}^{-1}$ est la dynamique du maître après le retour de la force locale. En utilisant les paramètres qu'hybrides du MSN les Impédances de transmission sont obtenues comme :

$$Z_{to} = \frac{[(1 + E_6)Z_{CS} - C_1 E_2 e^{-2sT_d}] + [(1 + C_5)(1 + E_6) - C_1 E_4^{-1} e^{-2sT_d}] Z_e}{[Y_{em} Z_{CS} + E_2 C_3 e^{-2sT_d}] + [(1 + C_5)Y_{em} + C_2 E_4^{-1} e^{-2sT_d}] Z_e}$$

(A.12)

$$Z_{ts} = \frac{[(1 + E_6)Z_{CS} - C_1 E_2 e^{-2sT_d}] + [Y_{em} Z_{CS} + E_2 C_3 e^{-2sT_d}] Z_h}{[(1 + C_5)(1 + E_6) - C_1 E_4^{-1} e^{-2sT_d}] + [(1 + C_5)Y_{em} + C_2 E_4^{-1} e^{-2sT_d}] Z_h}$$

(A.13)

Pour ce type de système de téléopération, la loi de commande d'optimisation de transparence est :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = Z_{cs} \\ E_2 = 1 + E_6 \\ C_3 = 1 + C_5 \\ (E_4)^{-1} = -Y_{em} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Ensemble de conditions d'une Admittance} \\ \\ \\ \text{Impédance parfaitement transparente} \end{array} \quad (A.14)$$

Et $(E_2, C_3) \neq (0, 0)$. Similairement aux deux autres cas précédents, la dynamique du maître et d'esclave est annulée et le système devient parfaitement transparent avec une stabilité marginale absolue. Noter qu'à partir de (A.14), conjugué exactement au cas d'Impédance Admittance, théoriquement, en plaçant le paramètre de commande local *de* position du maître E_6 ou le paramètre de commande de force local d'esclave C_6 par (-1), il est possible d'éliminer l'alimentation direct du maître ou la force direct d'esclave, respectivement, et obtiennent des architectures de commande à trois-canaux transparent.

A.3- téléopérateurs du Type Admittance -Admittance :

La figure A.3 montre le schéma fonctionnel général d'un système de téléopération du type Admittance -Admittance commandé par un contrôleur bilatéral général à quatre canaux. Dans ce système le maître et l'esclave sont des dispositifs d'Admittance et acceptent des positions comme commandes de control. Les contrôleurs du maître et d'esclave sont exprimés dans (A.10) et (A.1) et la dynamique du système fermé est régie par (A.11) et (A.2).



En utilisant les paramètres hybrides de MSN, l'opérateur et l'environnement transmis les Impédances sont obtenues comme :

$$Z_{co} = \frac{[(1 + E_5)(1 + E_6) - E_2 E_3 e^{-2sT_d}] + [(1 + E_6)Y_{es} + E_3 E_4^{-1} e^{-2sT_d}]Z_e}{[(1 + E_5)Y_{em} + E_1^{-1} E_2 e^{-2sT_d}] + [Y_{em} Y_{es} + E_1^{-1} E_4^{-1} e^{-2sT_d}]Z_e} \quad (\text{A.15})$$

$$Z_{ce} = \frac{[(1 + E_5)(1 + E_6) - E_2 E_3 e^{-2sT_d}] + [(1 + E_5)Y_{em} + E_1^{-1} E_2 e^{-2sT_d}]Z_h}{[(1 + E_6)Y_{es} + E_3 E_4^{-1} e^{-2sT_d}] + [Y_{em} Y_{es} + E_1^{-1} E_4^{-1} e^{-2sT_d}]Z_h}$$

(A.16)

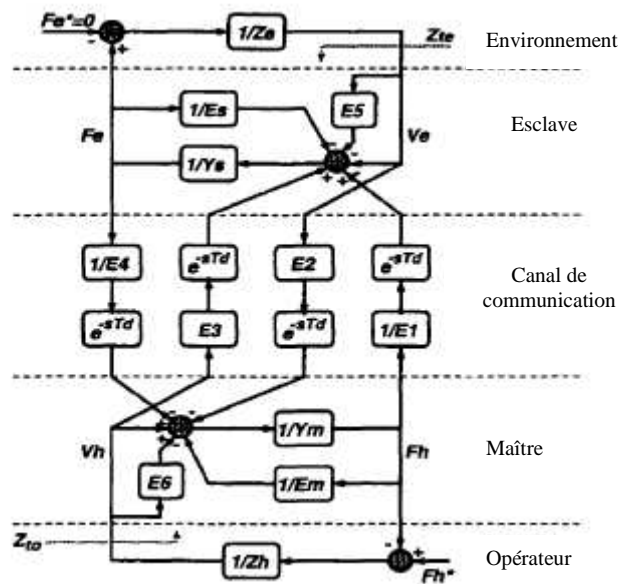


Figure A.3: Schéma fonctionnel d'un système de téléopération de type d'Admittance - Admittance commandé par un contrôleur général à quatre canaux.

Le transparent parfait sous les conditions idéales est réalisé si et seulement si :

$$\begin{cases} E_1^{-1} = Y_{es} \\ E_2 = 1 + E_6 \\ E_3 = 1 + E_5 \\ E_4 = -Y_{em} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Ensemble des conditions d'une} \\ \text{transparence parfaite de type} \\ \text{Admittance - Admittance} \end{array} \quad (\text{A.17})$$

Et $(E_2, E_3) \neq (0,0)$ est pris, où Y_{sm} , et Y_{ss} , ont été définis plus tôt. En utilisant la loi de commande d'optimisation de transparence (A.17), le système devient marginalement absolument stable. De (A.17) il est observé que conjugué à duel aux systèmes d'Impédance - Impédance, dans la théorie, en plaçant le paramètre local principal E_6 de commande *de position* ou le paramètre local slave es de commande *de position* à -1, il est possible pour éliminer direct le feedforward de position au maître ou le feedforward direct de position à l'esclave, respectivement, et obtiennent des architectures transparentes du trois-canal de control.



B-1 La Modélisation Du Bras Manipulateur :

Le bras manipulateur qui utilise dans le site maître et site l'esclave est à trois degrés de liberté et ses rotations sont autour de l'axe (x) comme le montre la figure suivante :

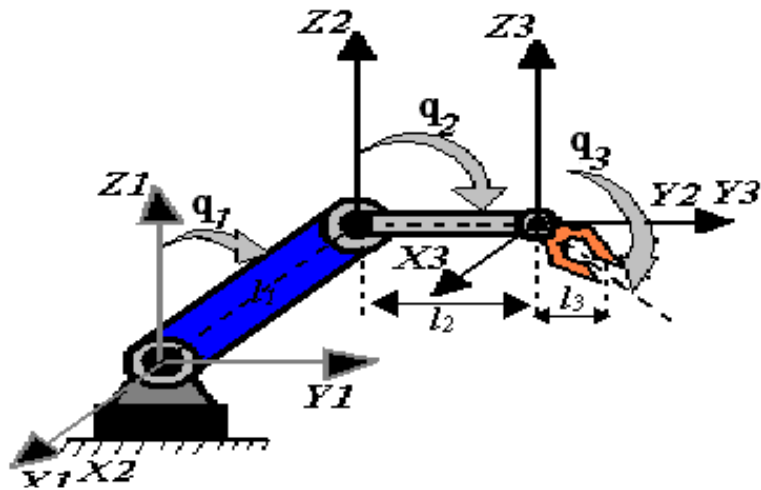


Figure B.1 : Présente le bras manipulateur à trois degrés de liberté utilisé dans le site maître et esclave (les trois rotations s'effectuent autour de l'axe (x))

➤ *Modèle Dynamique :*

La dynamique d'étude des lois et des causes du mouvement est fondée principalement sur la mécanique classique issue des de NEWTON. Les notions de masse (grandeur associée au système) et de force (grandeur décrivant l'action du monde extérieur sur le système) y jouent un rôle essentiel.

Le formalisme de Lagrange est utilisé pour modéliser le comportement dynamique d'un robot, cette approche particulière est assez simple à mettre en œuvre et elle est bien adaptée aux techniques de calcul manuel ainsi qu'aux méthodes de calcul assisté par ordinateur :

- *Equation de Lagrange*

Les équations de Lagrange opèrent à partir de l'énergie cinématique et de l'énergie potentielle d'un système. Le Lagrangien L s'écrit :

$$L = E_c - E_p \quad (B-1)$$

E_c : Energie cinétique

E_p : Energie potentielle.

Les équations de Lagrange sont définies par :

$$\sum_{i=1}^N \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \Gamma_i \quad (\text{B-2})$$

q_i : Les variables articulaires des systèmes à N degrés de liberté.

Γ_i : Représente le couple ou la force F_i qui agit sur le système de rang i.

Ce formalisme de mise en équation d'un système est le plus pratique car les énergies cinétiques et potentielles sont des grandeurs qui sont additives.

On va décrire le comportement du bras manipulateur sous forme d'un modèle de connaissance, et pour cela on introduit le Lagrangien suivant les équations (B-1) et (B-2), ceci est donné par :

$$L = E_{ci} - E_{pi}$$

$$E_{ci} = \frac{1}{2} J_i^T \dot{x}^2$$

On note que : $x_i = q_i$

D'après la loi de Huigenz le Jacobien J du bras par rapport a leur centre de gravité, est donné par :

$$J_i = \frac{m_i l_i^2}{12} + \frac{m_i l_i^2}{4} = \frac{m_i l_i^2}{3}$$

On aura, donc :

$$E_{ci} = \frac{m_i l_i^2}{6} \dot{x}^2$$

$$E_{pi} = m_i g \frac{L_i}{2} \cos(x_i)$$

Avec m_i désigne la masse du corps i, L_i la longueur de l'axe i.

Soit l'équation d'Euler-Lagrange suivante :

$$\sum_{i=1}^N \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \Gamma_i$$

$N=3$; pour un degré de liberté.

$\Gamma = F$; la force d'entrée de système.

Les équations différentielles sont données comme:



$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = \frac{1}{3} m_i L_i^2 \dot{x}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = \frac{1}{3} m_i L_i^2 \ddot{x}$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} = -m_i g \frac{L_i}{2} \sin(x_i)$$

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

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = F_i \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{3} m_i L_i^2 \ddot{x} + m_i g \frac{L_i}{2} \sin(x_i) = F_i$$

Pour: $x \leq 10^\circ$, $\sin(x) = x$

On déterminant la transformation de Laplace de l'équation précédente, et on écrit l'équation sous la forme :

$$\frac{x_i(s)}{F_i(s)} = Z_{mi}^{-1} = \frac{s}{\frac{1}{3} m_i L_i^2 s^2 + m_i g \frac{L_i}{2}}$$

Où s dénote l'opérateur de Laplace, et $i = 1, 2, 3$ les corps formant le bras.

➤ **L'application numérique donne :**

$$\frac{x_1(s)}{F_1(s)} = \frac{s}{0.33s^2 + 4.9}$$

$$\frac{x_2(s)}{F_2(s)} = \frac{s}{0.17s^2 + 3.17}$$

$$\frac{x_3(s)}{F_3(s)} = \frac{s}{0.06s^2 + 1.47}$$

C-1 La Modélisation Du Bras Manipulateur :

Le bras manipulateur qui utilise dans le maître et l'esclave est à trois degrés de liberté, son modèle dynamique est donné par (formalisme de Lagrange) :

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + \mu(\theta, \dot{\theta}, \tau, t) = \tau \quad (\text{C-1})$$

Où:

$\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$: Le vecteur des couples/ forces d'entrée

$\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$: Le vecteur de position articulaire.

$\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3]^T$: Le vecteur de vitesse articulaire

$\ddot{\theta} = [\ddot{\theta}_1 \ \ddot{\theta}_2 \ \ddot{\theta}_3]^T$: Le vecteur d'accélération articulaire

$M(\theta)$: La matrice d'inertie

$V(\theta, \dot{\theta})$: Le vecteur des forces centrifuges.

$\mu(\theta, \dot{\theta}, \tau, t)$: Englobe toutes les dynamiques négligées.

$G(\theta)$: Le vecteur de gravitationnel

$$\begin{bmatrix} \alpha + \beta + \gamma \cos(\theta_2) & -2\gamma \cos(\theta_2) - \beta & 0 \\ -2\gamma \cos(\theta_2) - \beta & \beta & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + l_1 l_2 \sin(\theta_2) \begin{bmatrix} -\dot{\theta}_2(m_2 + 2m_3) & -\dot{\theta}_2 \left(\frac{m_2}{3} + m_3\right) & 0 \\ -\dot{\theta}_1 \left(\frac{m_2}{3} + m_3\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_3 g \end{bmatrix} + \mu(\theta, \dot{\theta}, \tau, t) = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix}$$

$$\alpha = l_1^2 \left(\frac{m_1}{3} + m_2 + m_3 \right)$$

$$\beta = l_2^2 \left(\frac{m_2}{3} + m_3 \right)$$

$$\gamma = l_1 l_2 (m_2 + 2m_3)$$

m_i et l_i désignent respectivement la masse du corps i et la longueur de l'axe i .

Les valeurs numériques :

$$m_1 = 1 \text{ kg}, m_2 = 0.8 \text{ kg}, m_3 = 0.5 \text{ kg}, g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$l_1 = 1.0 \text{ m}, l_2 = 0.8 \text{ m}, l_3 = 0.6 \text{ m}$$



C-2 Défauts Actionneurs et défauts composants

➤ Les défauts Actionneurs

$$F_\alpha = \rho \tau \quad 0 \leq \rho \leq 1$$

Avec : $\rho = [0.89 \ 0.91 \ 0.96]$

➤ défauts composants

$$F_c = \begin{bmatrix} 30\dot{\theta}_1 + 30\text{sign}\dot{\theta}_1 \\ 0.7\dot{\theta}_2 + 0.7\text{sign}\dot{\theta}_2 \\ 50\dot{\theta}_3 + 50\text{sign}\dot{\theta}_3 \end{bmatrix}$$

C-3 Programmation et simulation sous Matlab

Les positions

```
function qt=traj(t)
q1in=pi/6;q1fin=pi/2;
q2in=pi/4;q2fin=pi/2;
q3in=pi/3;q3fin=pi/2;
    r=sin(2*t);
    q1d=r*(q1fin-q1in);
    q2d=r*(q2fin-q2in);
    q3d=r*(q3fin-q3in);
qt=[q1d;q2d;q3d];
```

Les vitesses

```
function qv=vits(t)
q1in = pi/6; q1fin = pi/2;
q2in = pi/4;q2fin = pi/2;
q3in = pi/3; q3fin = pi/2;
    r = 2*cos(2*t);
    q1d = r*(q1fin-q1in);
    q2d = r*(q2fin-q2in);
    q3d = r*(q3fin-q3in);
qv = [q1d;q2d;q3d];
```



L'apprentissage

```

[t,x,a,z,e,r,y,u]=sim('PDcontrol',[0 3]);
[m,n]=size(a)
%-----initialisation des poids-----
W1=[0.12 0.25 0.42 0.62 0.8 ];
W2=[0.015 0.260 0.66 0.77 0.9 ];
W3=[0.04 0.48 0.59 0.44 0.22 ];
W4=[0.3 0.43 0.84 ];
W5=[0.7 0.6 0.5 ];
W6=[0.77 0.66 0.55 ];
for(ii=1:3001)
for(j=1:1:m)
entree=[1;a(j,1);z(j,1);e(j,1);r(j,1)];
%-----calcul la valeur de chaque sortie-----
O1=W1(1,1)+W1(1,2)*a(j,1)+W1(1,3)*z(j,1)+W1(1,4)*e(j,1)+W1(1,5)*r(j,1);
O2=W2(1,1)+W2(1,2)*a(j,1)+W2(1,3)*z(j,1)+W2(1,4)*e(j,1)+W2(1,5)*r(j,1);
O3=W3(1,1)+W3(1,2)*a(j,1)+W3(1,3)*z(j,1)+W3(1,4)*e(j,1)+W3(1,5)*r(j,1);
O12=[1;O1;O2];
O23=[1;O2;O3];
O4=W4(1,1)+W4(1,2)*O1+W4(1,3)*O2;
O5=W5(1,1)+W5(1,2)*O2+W5(1,3)*O3;
O23=[1;O4;O5];
O6=W6(1,1)+W6(1,2)*O4+W6(1,3)*O5;
%-----Calcul de delta pour chaque neurone-----
CeSor1=(y(j,1)-O4);
CeSor2=(y(j,1)-O5);
CeSor3=(y(j,1)-O6);
CeIn1=(W4(1,2)*CeSor1);
CeIn2=(W4(1,3)*CeSor1+W5(1,2)*CeSor2);
CeIn3=(W5(1,3)*CeSor2);
CeIn4=(W6(1,3)*CeSor3);
for(i=1:1:5)
%----- mise à jour des poids de la premiere couche 1-----
W1(1,i)=W1(1,i)+0.00000000640*CeIn1*entree(i,1);

```



```
W2(1,i)=W2(1,i)+0.00000000833*CeIn2*entree(i,1);
W3(1,i)=W3(1,i)+0.00000000518*CeIn3*entree(i,1);
end
for(i=1:1:3)
%----- mise à jour des poids de la deuxieme couche -----
W4(1,i)=W4(1,i)+0.0000000291*CeSor1*O12(i,1);
W5(1,i)=W5(1,i)+0.0000000001*CeSor2*O23(i,1);
W6(1,i)=W6(1,i)+0.0000000001*CeSor3*O45(i,1);
end
end
end
%-----les poids après apprentissage-----
W=[W1;W2;W3;W4;W5;W6];
poids_W = [poids_W,W];
```

