

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : automatique

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

Thème

***Diagnostic d'un bras manipulateur
Par
Analyse fréquentielle***

Présenté par :

BAIDA ELARBI

Soutenu le : Juin 2018

Devant le jury composé de :

Mme. MECHGOUG. R

Mme. TERKI. N

Mme. MEGHERBI .H

M.C.A

PR

M.C.A

Président

Encadreur

Examineur

Année universitaire : 2017 / 2018

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : automatique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Diagnostic d'un bras manipulateur

Par

Analyse fréquentielle

Présenté par :

BAIDA ELARBI

Avis favorable de l'encadreur :

TERKI. N

Avis favorable du Président du Jury

MECHGOUG. R

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Automatique

Option:

Thème:

*Diagnostic d'un bras manipulateur
Par
Approche fréquentiel*

Proposé et dirigé par :

RESUMES (Français et Arabe)

Dans les méthodes modernes de conception des systèmes industriels automatisés, la maîtrise de la sûreté de fonctionnement, dès les premières phases de conception, occupe une place de plus en plus importante. La sûreté de fonctionnement du bras manipulateur peut être définie comme l'aptitude du robot à effectuer les tâches pour lesquelles il a été conçu. Cette capacité peut être entravée par les défaillances ou les défauts de fonctionnement.

L'objectif de ce travail de recherche est d'analyser le comportement d'un bras manipulateur en état sain puis défaillant, par analyse fréquentielle : FFT et STFT .

Des simulations ont été effectuées sous l'environnement Matlab/Simulink afin de tester les performances du bloc de détection

في الأساليب الحديثة لتصميم الأنظمة الصناعية الآلية و انطلاقاً من المراحل الأولى من التصميم ، تحتل رقابة السلامة التشغيلية مكاناً متزايد الأهمية.

يمكن تعريف سلامة التشغيل لذراع الروبوت بأنها قدرة الروبوت على أداء المهام التي تم تصميمه من أجلها
الهدف من هذا البحث هو تحليل سلوك ذراع الروبوت في وجود و عدم وجود اعطاب و هذا باستعمال تحليل الإشارة: FFT و STFT

أجريت المحاكاة باستعمال Matlab / Simulink لإختبار أداء نظام استشعار الأعطاب

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier DIEU le miséricordieux de nous avoir donné la possibilité de réaliser notre projet, d'arriver à notre souhait et d'atteindre notre objectif.

Nous aimerions dans ces quelques lignes remercier toutes les personnes qui d'une manière ou d'une autre, ont contribué au bon déroulement de notre travail, tout au niveau humain qu'au niveau scientifique.

Je souhaite tout d'abord remercier mon encadreur NADJIBA TERKI et SALOUA OUARHLEN Grand remerciement à tous les enseignants de la faculté de génie électrique. Nos remerciements s'adressent également à tous les membres de Jury qui ont accepté de nous honorer de leur présence et de juger notre travail

Merci.

Et Enfin, je m'excuse à tous les personnes qui j'oublier ses noms et qui ne sont pas été citées.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

· Mes parents :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Mes frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité. A toute ma famille

A mes enseignants. A mes Amies ET mes collègues ET la promotion de juin 2018

Baida Elarbi

Liste des Tableaux

(Tab. III.1) : Exemples de modèles de défauts composants et électriques

Liste des figures

- (Fig. I.1) : Signal indicateur
- (Fig. I.2) : Procédure de détection et d'isolation des défauts.
- (Fig. I.3) : Description des types de défauts.
- (Fig. I.4) : Classifications des méthodologies de diagnostic industriel
- (Fig. II.1) : Robots volants
- (Fig. II.2) : Robots humanoïdes
- (Fig. II.3) : Robots mobiles
- (Fig. II.4) : Robots sous-marins
- (Fig. II.5) : Robots manipulateurs
- (Fig. II.6) : constituants d'un bras manipulateurs.
- (Fig. II.7) : Bras à deux degré de liberté (2ddl)
- (Fig. III.1) : Représentation temporelle et fréquentielle somme de deux sinusoïdes : mêmes amplitudes.
- (Fig. III.2) : Représentation temporelle et fréquentielle somme de deux sinusoïdes : Différentes amplitudes.
- (Fig. III.3) : Perte de localisation temporelle
- (Fig. III.4) : Commande PID.
- (Fig. IV.1) : Vitesses articulaires : réelles et désirées
- (Fig. IV.2) : Signal, FFT, STFT et le Résidu pour le signal avec défaut 10%
- (Fig. IV.3) : Signal, FFT, STFT et le Résidu pour le signal avec défaut 30%
- (Fig. IV.4) : Signal, FFT, STFT et le Résidu pour le signal avec défaut 50%
- (Fig. IV.5) : Signal, FFT, STFT et le Résidu pour le signal avec défaut 70%
- (Fig. IV.6) : Signal, FFT, STFT et le Résidu pour le signal avec défaut 90%
-

Liste des abréviations

τ : Vecteurs des couples/forces des actionnaires, selon que l'articulation est rotoïde ou prismatique (dans la suite en écrira tout simplement couple).

q : Vecteur des positions articulaires.

\dot{q} : Vecteur des vitesses articulaires.

\ddot{q} : Vecteur des accélérations articulaires.

f_e : Vecteur représentant les efforts extérieur (forces et moment) qu'exerce le manipulateur sur l'environnement.

L : Fonction lagrangienne de robot égale à : $L = E_c - E_p$

E_c : Energie cinétique totale du robot manipulateur.

E_p : Energie potentielle totale du robot manipulateur.

$\theta \in R$: Vecteur des positions articulaires.

θl_1 : l_1 m est la longueur du lien 1.

l_2 : l_2 m est la longueur du lien 2.

m_1 : 1 Kg est la mass du lien 1.

m_2 : 1 Kg est la mass du lien 1.

θ_1 : Est l'angle de rotation de l'articulation 1.

θ_2 : Est l'angle de rotation de l'articulation 2.

$r_1 = r_2$: 0,5 m est la distance à la moitié du lien.

$R \in$: Vecteur des vitesses articulaires.

τ : Vecteur des couples ou des forces généralisées.

θ : Vecteur des variables articulaires du bras manipulateur.

$\dot{\theta}$: Vecteur des vitesses articulaires.

$\ddot{\theta}$: Vecteur des accélérations articulaires.

$M(\theta)$: Matrice d'inertie de dimension $(n \times n)$.

$C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$: Vecteur des forces centrifuges et de Coriolis.

$G(\theta)$: Vecteur de force de gravité de la charge.

$F(\theta, \dot{\theta}, \tau, t) \in R^n$: Représente la dynamique du défaut.

$\beta(t - T) \in R^{n \times n}$: Traduit l'apparition ou pas du défaut considéré.

T : C'est l'instant où le défaut se produit.

$(\theta_a - \theta)$: Vecteur de l'erreur de position

$(\dot{\theta}_a - \dot{\theta})$: Vecteur de l'erreur de vitesse

Sommaire

| | |
|---|----|
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre I : Etat De l'art Sur Le Diagnostic Des Défauts | |
| Introduction..... | 3 |
| 1. 1. Définitions | 3 |
| 1.1.1. Termes généraux..... | 3 |
| 1.1.2. Fonctions..... | 5 |
| 1.2. Procédure de détection et d'isolation des défauts..... | 6 |
| 1.3. Type de défaut..... | 7 |
| 1.4. Méthodes de diagnostic | 8 |
| 1.5. Caractéristiques des méthodes de diagnostic..... | 9 |
| Conclusion..... | 10 |
| Chapitre II : Modélisation des robots manipulateurs | |
| Introduction..... | 11 |
| 2.2. Apparition des robots des robots manipulateurs | 11 |
| 2.3. Historique..... | 12 |
| 2.4. Définition des robots manipulateurs | 12 |
| 2.5. Applications des robots manipulateurs | 12 |
| 2.6. Les différentes catégories des robots | 13 |
| 2.7. Vocabulaire utilise dans le domaine de la robotique..... | 14 |
| 2.8. Modélisation des robots manipulateurs..... | 15 |
| 2.8.1. Introduction | 15 |
| 2.8.2. Modélisation des robots manipulateurs | 17 |
| 2.8.3. Modèle dynamique..... | 18 |
| 2.8.4. Modèle dynamique inverse..... | 18 |
| 2.8.4. 1.Formalisme de Lagrange..... | 19 |
| Conclusion..... | 25 |
| Chapitre III : Méthodes de traitement des signaux dédiées au diagnostic des défauts de robot manipulateur | |
| Introduction..... | 26 |
| 3.2. Transformée de Fourier..... | 26 |

| | |
|--|----|
| 3.2. 1. La transformée de Fourier rapide (FFT)..... | 27 |
| 3.2.2. La transformée de Fourier à court terme (TFCT)..... | 30 |
| 3. Modélisation des défauts | 31 |
| 3.4. Commande PID du robot SCARA..... | 32 |
| Conclusion..... | 34 |
| Chapitre IV : Tests et validation | |
| Introduction..... | 35 |
| 4.2. Boucle de correction du robot SCARA..... | 35 |
| 4.3. Interprétations et commentaires..... | 47 |
| Conclusion..... | 49 |
| Conclusion générale..... | 50 |
| Bibliographie | |
| Annexe | |

INTRODUCTION GENERALE

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

Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis le début des années 70. En effet, la recherche dans ce domaine n'a fait que prendre de l'importance dans le monde entier. Généralement, lorsqu'on parle du diagnostic des défauts, on se réfère à la procédure de détection et d'isolation de ces derniers que l'on retrouve dans la littérature sous la forme FDI (Faut Détection and Isolation). Le rôle d'une telle procédure est de détecter la présence du défaut et de localiser sa provenance le plus rapidement possible.

Le domaine de la robotique est un autre exemple qui sollicite énormément les techniques FDI. En effet, conçus à l'origine afin de réaliser des tâches pénibles et dangereuses pour l'homme, les robots ont largement été utilisés en industrie afin d'augmenter la productivité (soudage, peinture, assemblage...etc.). A moyen terme, ils tendent à investir de plus en plus notre vie quotidienne. De ce fait, la robotique constitue un marché porteur et très lucratif. A l'avenir, les experts annoncent une forte croissance du nombre de robots notamment dans le domaine de la robotique de service, l'assistance aux personnes handicapées, la robotique médicale ou encore pour les loisirs.

L'organisation du mémoire

Le travail, présenté dans le cadre de ce mémoire, consiste à faire une synthèse sur l'état de l'art du Diagnostic des pannes et d'appliquer ensuite les méthodes de l'analyse fréquentiel pour la détection des défauts que nous avons appliqués à un robot industriel de type SCARA 2 ddl.

Ce mémoire se compose de quatre chapitres qui peuvent être résumés comme suit :

Le premier chapitre présente l'état de l'art sur le diagnostic des défauts des systèmes physiques. Dans la littérature associée à ce domaine, on peut trouver plusieurs définitions quelquefois divergentes. C'est pourquoi nous nous positionnons dans la première partie de ce chapitre, en donnant des définitions des mots clés qui sont utiles pour la compréhension de ce mémoire.

L'objet du deuxième chapitre donne un aperçu général sur les robots : définitions, apparition, application différentes catégories et modélisation. Nous avons donné le modèle dynamique du robot SCARA 2ddl, en appliquant le formalisme de Lagrange-Euler

Le troisième chapitre est consacré aux méthodes de traitement des signaux dédiées au diagnostic des défauts de robot manipulateur

Enfin, des simulations seront effectuées sur le modèle du robot industriel SCARA à deux degrés de liberté.

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

Chapitre I

Etat de l'art sur le Diagnostic des

I. INTRODUCTION

Dans de nombreux secteurs industriels, la sûreté de fonctionnement est un enjeu majeur pour assurer une continuité optimale de l'outil de production. Tout changement indésirable ou un arrêt inattendu provoquera des pertes économiques considérables. Pour éviter ce genre de problèmes, les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de diagnostic fiables permettant de détecter n'importe quel défaut, ou changements dans l'état de fonctionnement avant la défaillance totale [1].

Ce chapitre sera consacré aux définitions et notions de base du diagnostic de défauts en industrie.

Les définitions suivantes ont été extraites à partir des références suivantes : [2], [3].

I.1. DEFINITIONS

I.1.1. TERMES GENERAUX

❖ **Faute**

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

❖ **Défaut**

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

❖ **Dégradation**

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

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

❖ *Défaillance*

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

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

- *Défaillance critique* : nécessite une intervention d'urgence.
- *Défaillance significative* : nécessite un processus de traitement.
- *Défaillance absorbable* : pouvant être ignorée dans un premier temps.

❖ *Erreur*

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

❖ *Panne*

Une panne est l'inaptitude d'une entité (composant ou système) à assurer une fonction requise.

❖ *Résidu*

Signal conçu comme indicateur d'anomalies fonctionnelles ou comportementales.

❖ *Mode de fonctionnement*

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

- ***Mode de fonctionnement nominal*** : c'est le mode où l'équipement ou le système industriel remplit sa mission dans les conditions de fonctionnement requises par le constructeur et avec les exigences attendues de l'exploitant.
- ***Mode de fonctionnement dégradé*** : qui correspond soit à l'accomplissement partiel de la mission, soit à l'accomplissement de celle-ci avec des performances moindre

- **Mode de défaillance** : qui correspond à des mauvais fonctionnements du système, c'est-à-dire qu'il y a eu défaillance soit après dégradation soit défaillance brusque.

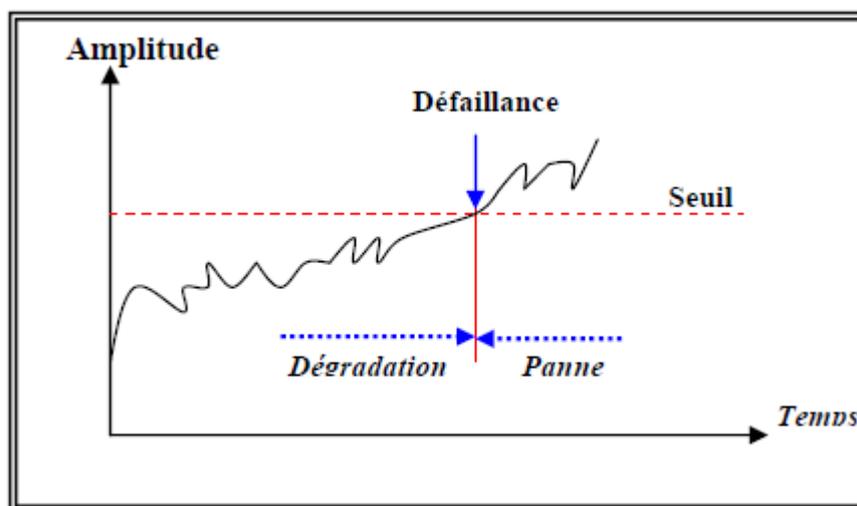


Figure I.1 : Signal indicateur

1.1.2. FONCTIONS

❖ Acquisition

Collecte des données en provenance du procédé.

❖ Détection

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

❖ Suivi

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

❖ Diagnostic

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

❖ Localisation

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

❖ Identification de la cause

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

❖ Reconfiguration

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

1.2. PROCEDURE DE DETECTION ET D'ISOLATION DES DEFAUTS

La procédure de détection et d'isolation des défauts passe par trois étapes essentielles : La détection, la localisation et l'identification.

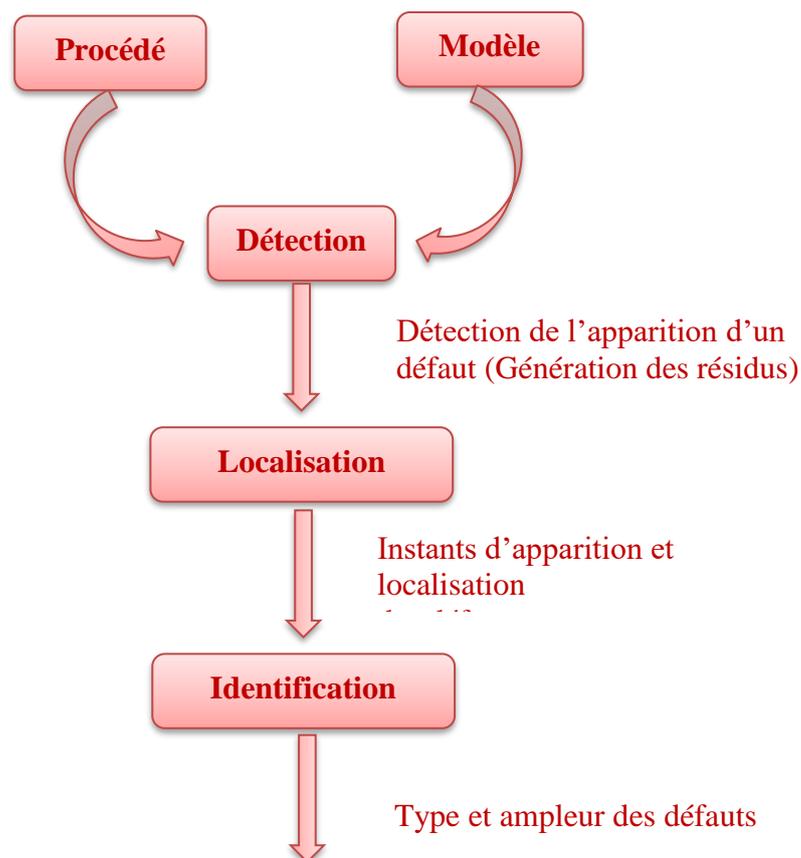


Figure I.2 : Procédure de détection et d'isolation des défauts.

I.3. TYPE DE DEFAUT

Un défaut peut être défini comme une modification suffisamment importante et permanente des caractéristiques physiques d'un système ou d'un composant. Un système défaillant (qui subit un défaut) est incapable d'accomplir correctement ça où ces fonctions avec les performances requises. Comme le montre la Figure I.2, nous distinguons trois types de défauts [4], [5], [6].

Défauts capteurs : défauts représentant l'ensemble des problèmes liés à la prise d'information sur l'état physique du système (mauvais étalonnage du capteur, vieillissement de l'organe récepteur d'un capteur, etc...).

Défauts actionneurs : défauts qui agissent au niveau de la partie opérative et détériorent ainsi le signal d'entrée du système (perte de puissance d'un moteur, fuite dans un vérin, etc...).

Défauts système : défauts identifiés à la modification des caractéristiques du système proprement dit. Soit due à une variation significative des paramètres du modèle (vieillesse des matériaux par exemple) soit à un changement structurel causant une modification du flot d'informations entre les différentes variables (tel qu'une fuite dans une cuve).

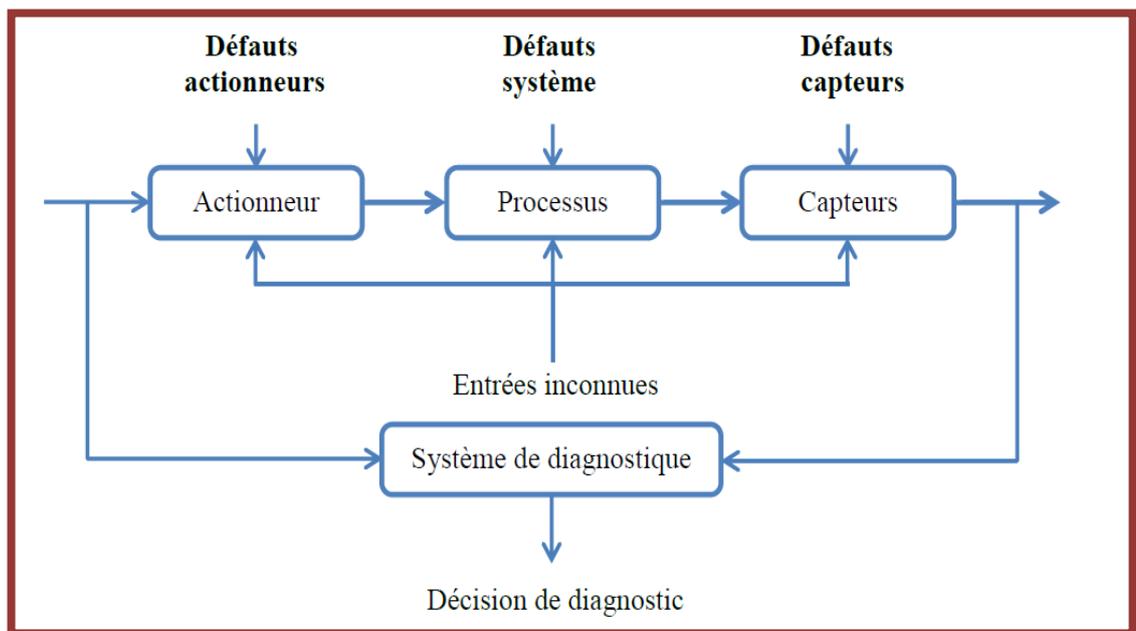


Figure I.3 : Description des types de défauts.

II.4. METHODES DE DIAGNOSTIC

Les méthodologies de diagnostic sont généralement divisées en deux groupes : méthodologies de diagnostic *avec modèle* et *sans modèle* [7]. Les premières se basent sur l'existence d'un modèle formel de l'équipement et utilisent généralement les techniques de l'automatique [7]. La deuxième catégorie de méthodologies est plus intéressante dès lors qu'un modèle de l'équipement est inexistant ou difficile à obtenir. Dans ce cas, on utilise les outils de la statistique et de l'Intelligence Artificielle. La fonction surveillance est alors vue comme une application de reconnaissance des formes. Les formes représentent le vecteur d'entrée composé par les différentes données de l'équipement (données mesurables et qualifiables), et les classes représentent les différents modes de fonctionnement.

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses et variées, elles correspondent à la diversité des problèmes rencontrés. Il est possible de les classer selon le schéma de la figure (I.4), [4].

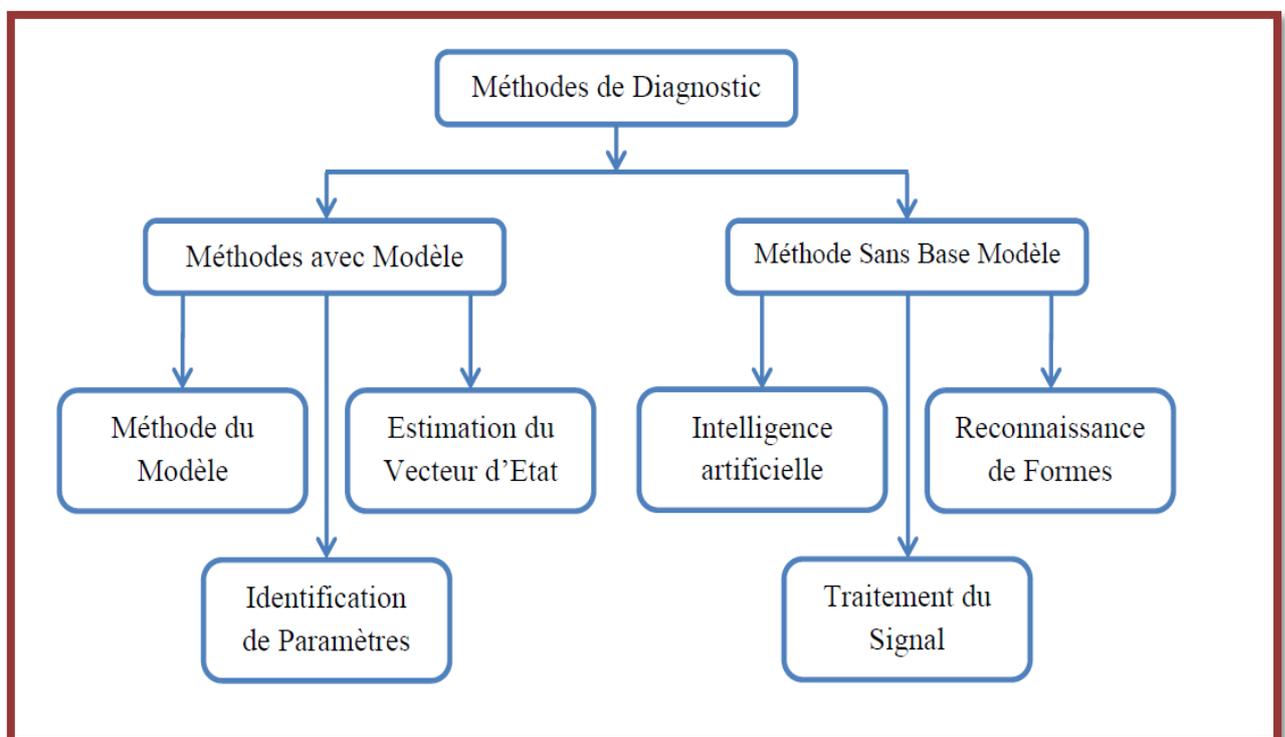


Figure I.4 : Classifications des méthodologies de diagnostic industriel. [4]

1.5. CARACTERISTIQUES DES METHODES DE DIAGNOSTIC

Il existe un grand nombre de méthodes de diagnostic. Ces méthodes se basent sur un modèle du comportement normal et/ou défaillant du système. [8]

L'observation réelle de l'état courant du système, sujet du diagnostic, est comparée avec l'état estimé par le modèle afin de détecter un défaut. Chacune des méthodes de diagnostic doit garantir les caractéristiques suivantes :

- ✓ Le diagnostic doit être facile à implémenter,
- ✓ Le nombre de capteurs nécessaire pour le diagnostic doit être minimal,
- ✓ Le diagnostic doit être prédictif,
- ✓ Le diagnostic doit être réalisable en temps réel,
- ✓ Le diagnostic doit être concevable algorithmiquement.

1.6. CONCLUSION

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

Les méthodologies de diagnostic sont généralement divisées en deux groupes : Méthodologies de diagnostic avec modèle et sans modèle. Les premières se basent sur l'existence d'un modèle formel de l'équipement et utilisent généralement les techniques de l'automatique. La deuxième catégorie de méthodologies est plus intéressante dès lors qu'un modèle de l'équipement est inexistant ou difficile à obtenir. Dans ce cas, on utilise les outils de la statistique et de l'Intelligence Artificielle. La fonction diagnostic est alors vue comme une application de reconnaissance des formes.

Chapitre II

Modélisation des robots manipulateurs

II.1. INTRODUCTION

L'utilisation des systèmes robotiques apparaît aujourd'hui dans plusieurs domaines d'activités : la médecine, la défense, la recherche scientifique etc.... Les robots sont utilisés de manière privilégiée pour des missions où les objectifs sont quantifiables et clairement définis. Ils sont destinés à faciliter les tâches pour l'homme et à amplifier le rendement.

Dans ce chapitre, on va donner un aperçu non exhaustif sur les robots, un bref historique sur l'évolution de la robotique industrielle, présenter les différents types de robots et les éléments constitutifs de ces derniers. On passera ensuite, à la modélisation d'un bras manipulateur dynamique rigide à chaîne ouverte simple à deux degré de liberté, en tenant compte des effets de la vitesse.

II.2. APPARITION DES ROBOTS DES ROBOTS MANIPULATEURS

La genèse des robots manipulateurs est très récente. En effet, grâce au développement des servomécanismes dans la seconde guerre mondiale que les manipulateurs, Maître/Esclave, des substances radioactives ont vu le jour en 1950. En 1954 on a assisté au premier robot manipulateur programmable, deux ans après C. Devol introduit un brevet délivré en 1961 intitulé "Programme Articulated Transfer Device" et en cette année, les travaux de Devol et d'Engelberger conduisent au premier robot industriel sur une chaîne de montage de General Motors construit par la société Unimation Inc. Le point clé du système est d'utiliser un ordinateur en conjonction avec un manipulateur. Grâce à ces efforts, Unimate number 001 est entré en service dans une usine pour 100.000 heures, et Unimation Inc. délivre 66 machines entre 1966 et 1971. Dès 1971, de grands laboratoires de recherche commencent à se développer tels que la JIRA (Association Japonaise de Robotique Industrielle) au Japon, la RIA aux USA en 1975. En 1998, on comptait 700.000 robots industriels dans le monde [9].

De nos jours, les robots manipulateurs constituent les composants les plus importants des processus de fabrication et de contrôle. Ils ont comme impact; l'amélioration de la productivité, l'accroissement de la qualité des produits fabriqués, ainsi que la réduction du coût du travail.

II.3. HISTORIQUE

En 1947 : L'apparition de premier manipulateur électrique télé-opéré.

En 1945 : Invention du premier robot qui peut être programmé.

En 1961 : Montage d'un robot sur une chaîne de fabrication de General Motors.

En 1961 : Premier robot avec contrôle en effort.

En 1963 : Le premier contrôle du robot avec vidéo.

II.4. DEFINITION DES ROBOTS MANIPULATEURS

Selon la RIA (Robot Institute of America) c'est un manipulateur qui doit être reprogrammable multifonctionnel conçu pour déplacer des matériaux, des pièces, des outils ou tout autre dispositif spécialisé au moyen d'une série de mouvements programmés et d'accomplir une variété d'autres tâches [10]. L'ISO (International Standard Organization) l'a défini comme étant une machine mue par un mécanisme incluant plusieurs degrés de libertés, ayant souvent l'apparence d'un ou plusieurs bras se terminant par un poignet capable de tenir des outils, des pièces ou un dispositif d'inspection [11].

L'Organisation Internationale de Normalisation définit le robot comme étant un manipulateur à plusieurs degrés de liberté, à commande automatique, reprogrammable, multi applications, mobile ou non, destiné à être utilisé dans les applications d'automatisation industrielle [12].

Le terme robot a été introduit pour la première fois par l'auteur Tchèque Capek en 1920 dans sa pièce de théâtre R.U.R. (Rossum's Universal Robot) et il est dérivé du mot robota qui signifie travailleur (de force) [13].

II.5. APPLICATIONS DES ROBOTS MANIPULATEURS

Dans les entreprises manufacturières, des tâches pénibles, répétitives réalisées par des opérateurs humains peuvent être avantageusement confiées à des systèmes mécaniques articulés (les manipulateurs) dont la dextérité est sans égal celle de l'homme, suffisamment proches de celui-ci pour exécuter des mouvements complexes à l'image de ceux d'un bras humain. L'emploi de ces dispositifs s'avère d'ailleurs nécessaire pour des tâches d'intervention inaccessibles à l'homme en milieu hostile ou délicat, par exemple sous marin, nucléaire, médical ou spatial. Ils sont alors dotés

d'un dispositif de locomotion et peuvent être autonomes ou contrôlés à distance par un opérateur humain.

II.6. LES DIFFERENTES CATEGORIES DES ROBOTS

- ✓ Robots volants (figure II.1).
- ✓ Robots humanoïdes (figure II.2).
- ✓ Robots mobiles (figure II.3).
- ✓ Robots sous marins (figure II.4).
- ✓ Robots manipulateurs (figure II.5).



Figure(II.1). Robots volants



Figure(II.2). Robots humanoïdes



Figure(II.3). Robots mobiles



Figure(II.4). Robots sous marins

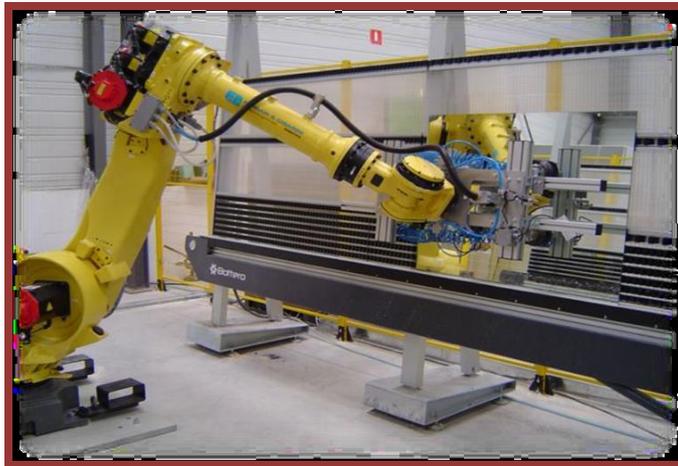


Figure (II.5). Robots manipulateurs

II.7. VOCABULAIRE UTILISE DANS LE DOMAINE DE LA ROBOTIQUE

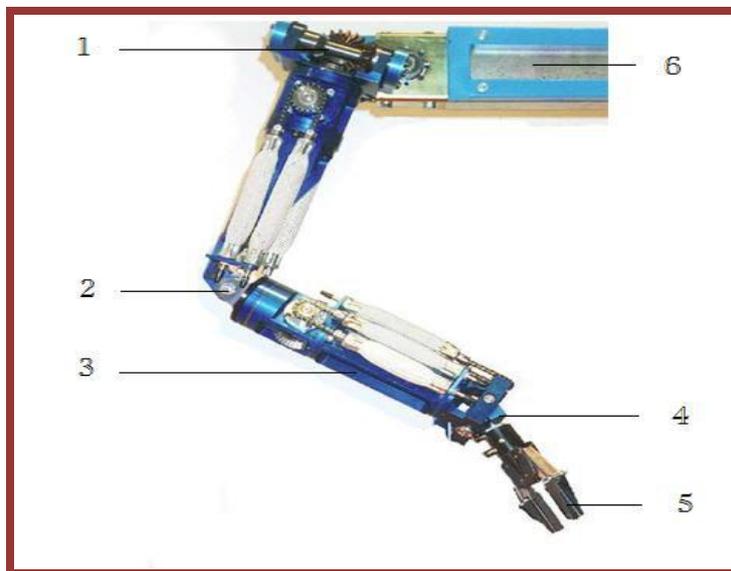


Figure (II.6) : constituants d'un bras manipulateurs.

1. Actionneur = moteur.
2. Axe = articulation.

3. Corps = segment.

4. Organe terminal.

5. Effecteur = outil.

6. Base.

La base :

La base du manipulateur est fixée sur le lieu du travail. Ceci est le cas de la quasi-totalité des robots industriels.

Segment :

Corps solides rigides susceptibles d'être en mouvement par rapport à la base du porteur, et les uns par rapport aux autres.

Articulation :

Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degré de liberté, de l'un par rapport à l'autre.

Actionneur :

Pour être animé, la structure mécanique articulée comporte des moteurs le plus souvent associés à des transmissions (courroies crantées), l'ensemble constitue les actionneurs. Les actionneurs utilisent fréquemment des moteurs électriques à aimant permanent, à courant continu, à commande par l'induit. On trouve de plus en plus de moteurs à commutation électronique (sans balais), ou, pour de petits robots, des moteurs pas à pas. Pour les robots devant manipuler de très lourdes charges (par exemple, une pelle mécanique), les actionneurs sont le plus souvent hydrauliques, agissant en translation (vérin hydraulique) ou en rotation (moteur hydraulique). (Les actionneurs pneumatiques sont d'un usage général pour les manipulateurs à cycles (robots tout ou rien). Un manipulateur à cycles est une structure mécanique articulée avec un nombre limité de degrés de liberté permettant une succession de mouvements contrôlés uniquement par des capteurs de fin de course réglables manuellement à la course désirée (asservissement en position difficile dû à la compressibilité de l'air) [14].

Organe terminal :

On regroupe tout dispositif destiné à manipuler des objets (dispositifs de serrage, dispositifs magnétiques, à dépression, ...), ou à les transformer (outils, torche de soudage, pistolet de peinture, ...). En d'autres termes, il s'agit d'une interface

permettant au robot d'interagir avec son environnement. Un organe terminal peut être multifonctionnel, au sens où il peut être équipé de plusieurs dispositifs ayant des fonctionnalités différentes. Il peut aussi être monofonctionnel, mais interchangeable. Un robot, enfin, peut-être multi-bras, chacun des bras portant un organe terminal différent. On utilisera indifféremment le terme organe terminal, préhenseur, outil ou effecteur pour nommer le dispositif d'interaction fixé à l'extrémité mobile de la structure mécanique, exemple : pistolet pour la soudure dans les robots industriels [14].

II.8. MODELISATION DES ROBOTS MANIPULATEURS

II.8.1. INTRODUCTION

Pour développer une stratégie de commande performante pour un robot (manipulateur), il est impératif de connaître la cinématique et la dynamique du robot considéré. Et comme les robots manipulateurs sont des systèmes mécaniques poly articulés [15], fortement non linéaires, d'une dynamique qui peut être mal définie, ils ont des paramètres variables et sont soumis à des perturbations externes. Pour pouvoir faire exécuter une action ou une tâche au robot manipulateur, il est nécessaire de modéliser ce système multi variable pour positionner les différents axes. La modélisation de ces systèmes relève très souvent d'une approximation des phénomènes physiques mis en jeu [16], c'est à partir de cette représentation approximative que l'on souhaite construire une commande pour le système réel, cette commande doit être alors robuste dans le sens où elle devra assurer une faible sensibilité aux incertitudes des paramètres, à leurs variations et aux perturbations externes.

Les erreurs de modélisation, les incertitudes sur l'estimation des paramètres physiques ainsi que les différentes perturbations externes influent beaucoup sur la qualité du contrôle. Tous ces facteurs doivent être pris en compte lors de la modélisation et de l'élaboration de la loi de commande pour préserver la qualité et la précision des tâches auxquelles est destiné le robot.

En effet la majorité des tâches confiées aux robots sont délicates et exigent une très grande précision sous des trajectoires précisées et rapides. Dans ce cas le type de commande nécessaire est la commande par découplage non linéaire, cette méthode qui est considérée comme la solution théorique idéale pour la commande de ce type de robot [17].

II.8.2. MODELISATION DES ROBOTS MANIPULATEURS

Pour commander un robot où pour simuler son comportement on doit disposer de modèles. Plusieurs niveaux de modélisation sont possibles selon les objectifs, les contraintes de la tâche et les performances recherchées : modèles géométriques, cinématiques et dynamiques. L'obtention de ses différents modèles n'est pas aisée, la difficulté variant selon la complexité de la cinématique de la chaîne articulée. Entrent en ligne de compte le nombre de degrés de liberté, le type des articulations mais aussi le fait que la chaîne peut être ouverte simple, arborescente ou fermée.

Ces modèles, qu'ils soient utilisés en simulation ou en commande, doivent représenter le comportement géométrique, cinématique ou dynamique du robot de façon réaliste. Il est donc nécessaire de mettre en œuvre des procédures efficaces d'identification de leurs paramètres constitutifs. Pour qu'une commande puisse effectivement être implantée sur un contrôleur de robot, les modèles doivent être calculés en ligne et donc, le nombre d'opérations à effectuer doit être minimum. Les techniques proposées ont été développées dans ce souci et conduisent aux modèles les plus performants.

La conception et la commande des robots nécessitent le calcul de certains modèles mathématiques, tels que : les modèles de transformation entre l'espace opérationnel (dans lequel est définie la situation de l'organe terminal) et l'espace articulaire (dans lequel est définie la configuration du robot). On distingue :

- ✓ **les modèles géométriques direct et inverse** qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction des variables articulaires du mécanisme et inversement.
- ✓ **les modèles cinématiques direct et inverse** qui expriment la vitesse de l'organe terminale fonction des vitesses articulaires et inversement.

- ✓ les **modèles dynamiques** définissant les équations du mouvement du robot, qui permettent d'établir les relations entre les couples ou forces exercées par les actionneurs et les positions, vitesses et accélérations des articulations.

II.8.3. MODELE DYNAMIQUE

Le modèle dynamique est la relation entre les couples et/ou forces appliqués aux actionnaires et les positions, vitesses et accélérations. Le modèle dynamique présenté par une relation de la forme :

$$\tau = f(q, \dot{q}, \ddot{q}, f_e) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

τ : Vecteurs des couples/forces des actionnaires, selon que l'articulation est rotoïde ou prismatique (dans la suite en écrira tout simplement couple).

q : Vecteur des positions articulaires.

\dot{q} : Vecteur des vitesses articulaires.

\ddot{q} : Vecteur des accélérations articulaires.

f_e : Vecteur représentant les efforts extérieur (fores et moment) qu'exerce le manipulateur sur l'environnement.

II.8.4. MODELE DYNAMIQUE INVERSE

Le modèle dynamique inverse exprime les couples exercés par les actionneurs en fonction des positions, vitesses et accélérations des articulations. Le modèle dynamique inverse est représenté par une relation de la forme :

$$\tau = f(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \quad (\text{II.2})$$

τ : Vecteur des couple/forces des actionneurs, selon que l'articulation est rotoïde ou prismatique.

θ : Vecteur des positions articulaires.

$\dot{\theta}$: Vecteur des vitesses articulaires.

$\ddot{\theta}$: Vecteur des accélérations articulaire.

Plusieurs formalismes ont été utilisés pour obtenir le modèle dynamique des robots. Les formalismes les plus souvent utilisés sont :

- ✓ Le formalisme de Lagrange-Euler : cette méthode est mieux adaptée pour le calcul du modèle dynamique que l'on utilise en simulation.
- ✓ Le formalisme de Newton-Euler : cette méthode est mieux adaptée pour le calcul du modèle dynamique que l'on utilise en commande.

Nous allons voir dans ce que suit la modélisation d'un bras manipulateur dynamique rigide, à chaîne ouverte simple, à deux degré de liberté, on va utiliser le formalisme de Lagrange pour déterminer les équations du mouvement.

1.8.4.1 FORMALISME DE LAGRANGE

Le formalisme de Lagrange décrit les équations du mouvement en termes de travail et d'énergie du robot. La forme générale représentant le mouvement d'un robot manipulateur constitué de n degrés de liberté et de n articulations, s'écrit suivant Lagrange :

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(\theta, \dot{\theta})}{\partial \dot{\theta}} \right] - \frac{\partial L(\theta, \dot{\theta})}{\partial \theta} = \tau \quad (\text{II.3})$$

L : Fonction lagrangienne de robot égale à : $L = E_c - E_p$

E_c : Energie cinétique totale du robot manipulateur.

E_p : Energie potentielle totale du robot manipulateur.

$\theta \in R$: Vecteur des positions articulaires.

$\dot{\theta} \in R$: Vecteur des vitesses articulaires.

Dans notre travail, nous avons considéré d'abord un robot manipulateur à 2ddl, donné par figure II.7, dont le mouvement des articulations est rotoïde .

✓ *Spécifications du robot*

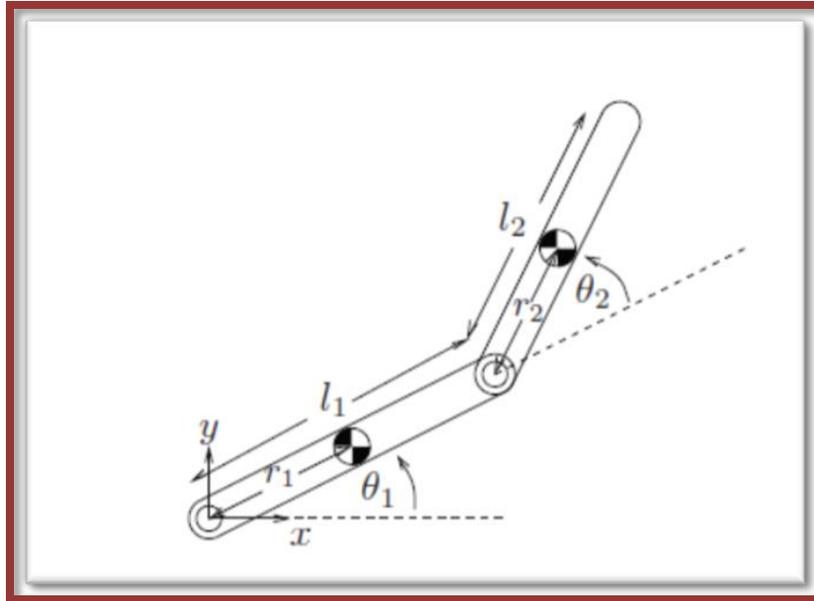


Figure (II.7) : Bras à deux degré de liberté (2ddl)

Considérons le robot à deux articulations représenté sur la figure (I.7) avec les spécifications suivantes en coordonnées OXY :

l_1 : 1 m est la longueur du lien 1.

l_2 : 1 m est la longueur du lien 2.

m_1 : 1 Kg est la mass du lien 1.

m_2 : 1 Kg est la mass du lien 1.

θ_1 : Est l'angle de rotation de l'articulation 1.

θ_2 : Est l'angle de rotation de l'articulation 2.

$r_1 = r_2$: 0,5 m est la distance à la moitié du lien.

On pose :

$$q = [\theta_1 \quad \theta_2]^T \quad \text{et} \quad \tau = [\tau_1 \quad \tau_2]^T$$

A partir de la figure (II.7), nous déterminons les coordonnées du bras manipulateur par rapport au repère x y, ce qui donne :

$$\begin{cases} x_1 = l_1 \cos(\theta_1) \\ y_1 = l_1 \sin(\theta_1) \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

$$\begin{cases} x_2 = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y_2 = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Ce qui donne $\begin{cases} \dot{x}_1 = -l_1 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) \\ \dot{y}_1 = l_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) \end{cases}$ et $\begin{cases} \dot{x}_1^2 = l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \sin^2(\theta_1) \\ \dot{y}_1^2 = l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \cos^2(\theta_1) \end{cases}$ (II.6)

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = -\dot{\theta}_1 l_1 \sin(\theta_1) - (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \dot{y}_2 = \dot{\theta}_1 l_1 \cos(\theta_1) + (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

➤ *Détermination de l'énergie cinétique E_c et de l'énergie potentielle E_{link1}*

$$\begin{cases} K_1 = \frac{1}{2} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \\ P_1 = m_1 g l_1 \sin \theta_1 \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

➤ *Détermination de l'énergie cinétique E_c et de l'énergie potentielle E_{link2}*

$$\begin{cases} x_2 = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y_2 = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \dot{x}_2 = -\dot{\theta}_1 l_1 \sin(\theta_1) - (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \dot{y}_2 = \dot{\theta}_1 l_1 \cos(\theta_1) + (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$$v_2^2 = \dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2$$

$$v_2^2 = \dot{\theta}_1^2 l_1^2 + (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 l_2^2 + 2l_1 l_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \quad (\text{II.10})$$

$$\begin{cases} K_2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \\ K_2 = \frac{1}{2} m_2 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2 l_1 l_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \\ P_2 = m_2 g y_2 = m_2 g [l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2^2 = \dot{\theta}_1^2 l_1^2 \sin^2(\theta_1) + (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 l_2^2 \sin^2(\theta_1 + \theta_2) + 2\dot{\theta}_1 l_1 \sin(\theta_1) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \dot{y}_2^2 = \dot{\theta}_1^2 l_1^2 \cos^2(\theta_1) + (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 l_2^2 \cos^2(\theta_1 + \theta_2) + 2\dot{\theta}_1 l_1 \cos(\theta_1) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{cases}$$

➤ **Détermination du Lagrangien $L = Ec - Ep$**

$$L = K - P = K_1 + K_2 - (P_1 + P_2) \quad (\text{II. 12})$$

$$L = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)l_1^2\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_2l_2^2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2l_1l_2(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2)\cos\theta_2 - (m_1 + m_2)gl_1\sin\theta_1 + m_2gl_2\sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{II. 13})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = (m_1 + m_2)l_1^2\dot{\theta}_1 + m_2l_2^2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + m_2l_1l_2(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\cos\theta_2 \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = (m_1 + m_2)l_1^2\ddot{\theta}_1 + m_2l_2^2(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \\ \quad + m_2l_1l_2(2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)\cos\theta_2 - m_2l_1l_2(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2^2)\sin\theta_2 \\ \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = -(m_1 + m_2)gl_1\cos\theta_1 - m_2gl_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \end{array} \right. \quad (\text{II. 14})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = m_2l_2^2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + m_2l_1l_2\dot{\theta}_1\cos\theta_2 \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = m_2l_2^2(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2l_1l_2\ddot{\theta}_1\cos\theta_2 - m_2l_1l_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\sin\theta_2 \\ \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = -m_2l_1l_2(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2)\sin\theta_2 - m_2gl_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \end{array} \right. \quad (\text{II. 15})$$

Ce qui donne :

$$\tau_1 = [(m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2\cos\theta_2]\ddot{\theta}_1 + [m_2l_2^2 + m_2l_1l_2\cos\theta_2]\ddot{\theta}_2 - m_2l_1l_2(2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2)\sin\theta_2 + (m_1 + m_2)gl_1\cos\theta_1 + m_2gl_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{II. 16})$$

$$\tau_2 = [m_2l_2^2 + m_2l_1l_2\cos\theta_2]\ddot{\theta}_1 + m_2l_2^2\ddot{\theta}_2 + m_2l_1l_2\dot{\theta}_2^2\sin\theta_2 + m_2gl_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{II. 17})$$

Alors on peut écrire :

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2\cos\theta_2 & m_2l_2^2 + m_2l_1l_2\cos\theta_2 \\ m_2l_2^2 + m_2l_1l_2\cos\theta_2 & m_2l_2^2 \end{bmatrix}}_{M(\theta)} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} \\
 &+ \underbrace{\begin{bmatrix} -m_2l_1l_2(2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2)\sin\theta_2 \\ m_2l_1l_2\dot{\theta}_2^2\sin\theta_2 \end{bmatrix}}_{C(\theta, \dot{\theta})} \\
 &+ \underbrace{\begin{bmatrix} (m_1 + m_2)gl_1\cos\theta_1 + m_2gl_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \\ m_2gl_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}}_{G(\theta)} \quad (\text{II.18})
 \end{aligned}$$

En robotique, si le mouvement des articulations constituant le robot manipulateur est rotoïde, l'expression du couple peut être s'exprimer sous la forme matricielle suivante, ce qui correspond au modèle dynamique du robot :

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) \quad (\text{II.19})$$

Avec :

τ : Vecteur des couples ou des forces généralisés.

θ : Vecteur des variables articulaires du bras manipulateur.

$\dot{\theta}$: Vecteur des vitesses articulaires.

$\ddot{\theta}$: Vecteur des accélérations articulaires.

$M(\theta)$: Matrice d'inertie de dimension $(n \times n)$.

$C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$: Vecteur des forces centrifuges et de Coriolis.

$G(\theta)$: Vecteur de force de gravité de la charge.

Soit $\tau = [\tau_1 \quad \tau_2]^T$, le développement de l'équation (II.19) donne :

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} = M(\theta)^{-1} [\tau - C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} - G(\theta)] \quad (\text{II.21})$$

$$M(\theta)^{-1} = \frac{1}{\det M} \begin{bmatrix} -m_2 l_2^2 & m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \\ m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 & -((m_1 + m_2) l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2) \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

$$\det M = \Delta = (m_2 l_2^2) \left((m_1 + m_2) l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \right) - (m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2)^2 \quad (\text{II.26})$$

$$M(\theta)^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} -m_2 l_2^2 & m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \\ m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 & -((m_1 + m_2) l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2) \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

D' où :

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} -m_2 l_2^2 & m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \\ m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 & -((m_1 + m_2) l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \\ & - \begin{bmatrix} \underbrace{-m_2 l_1 l_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \sin \theta_2}_{c(\theta, \dot{\theta})} \\ m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underbrace{(m_1 + m_2) g l_1 \cos \theta_1 + m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)}_{G(\theta)} \\ m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \\ & - \begin{bmatrix} \underbrace{(m_1 + m_2) g l_1 + m_2 g l_2}_{G(\theta)} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{II.24})$$

CONCLUSION:

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu général sur les robots, un historique sur l'évolution de la robotique industrielle, différents types de robots et les éléments constitutifs de ces derniers. Par la suite, Nous avons exposé la modélisation des robots manipulateurs : le modèle dynamique et le modèle dynamique inverse. Les équations du mouvement en termes de travail et d'énergie du robot ont été développées par le formalisme de Lagrange.

Chapitre III

Méthodes de diagnostic avec traitement des

III.1. Introduction

L'objectif du traitement du signal est d'analyser avec soin, coder efficacement, transmettre rapidement et reconstruire soigneusement un signal à partir de ses fluctuations et de ses oscillations, c'est dans cet axe que les outils de traitement de signal ont pris naissance l'un après l'autre, de la transformée de Fourier avec ses variétés aux ondelettes.

La transformée de Fourier, ou plus généralement l'analyse fréquentielle ou spectrale, est un outil fondamental pour la compréhension et la mise en œuvre de nombreuses techniques numériques de traitement des signaux. Cet outil trouve de nombreuses applications dans des différents secteurs tels que la reconnaissance vocale, l'amélioration de la qualité des images, la transmission numérique, le milieu biomédical et autres. Il a, également, envahi le domaine de diagnostic et détection des défauts dans les industriels [9].

Dns ce chapitre, on commence par donner un aperçu sur les méthodes d'analyse fréquentiel, la transformée de Fourier(FFT) et la transformer de Fourier à court terme TFCT, en vue de leur application dans le diagnostic d'un bras manipulateur. Ensuite, nous présentons la modélisation des différents défauts qui peuvent apparaître. Le diagnostic du robot se fait en boucle fermée (boucle de régulation PID), ainsi, une représentation des régulateurs PID est introduite à la fin du chapitre.

III.2. Transformée De Fourier

L'analyse de Fourier est une base majeure de la physique et des mathématiques. Elle est indissociable du traitement du signal, et ce pour deux raisons principales. La première est l'universalité du concept de fréquence sur lequel elle repose. La seconde tient à la structure même de l'analyse de Fourier qui se prête aisément à des transformations communes comme le filtrage linéaire en les traduisant de manière particulièrement simple.

En 1807, la transformation de Fourier a vu le jour, elle consiste à décomposer un signal périodique quelconque en une somme de signaux sinusoïdaux de différents amplitudes et déphasages. [18] [19]

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (\text{III.1})$$

La transformée de Fourier Discrète, généralement notée TFD, est une suite finie de N termes $x(0), x(1), x(2), \dots, x(N-1)$ et elle est calculée par la relation :

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi nk/N} \text{ Pour } k = 0, \dots, N-1 \quad (\text{III.2})$$

Où le terme N représente le nombre de points de calcul de la TFD. Ce terme joue sur la précision du tracé alors que le terme X est lié à la résolution en fréquence [18].

III.2.1 La Transformée De Fourier Rapide (FFT)

La transformée de Fourier rapide, est une technique mathématique de calcul rapide élaborée en 1965 par J. W. Cooley et J. W. Tuckey. La FFT permet de ramener le calcul de la transformée de Fourier discrète de N^2 à $N \cdot \log(N)$ opérations. Cette réduction de la complexité de calcul a suffi à faire passer facilement résolubles de nombreux problèmes liés à l'analyse spectrale. Pour une meilleure visualisation d'une analyse fréquentielle, la FFT est utilisée au travers d'une fenêtre glissante d'observation. Malgré sa célébrité et son succès, la FFT reste inadaptable pour les signaux non stationnaires et elle montre assez vite ses limitations, perte de localisation temporelle [18].

Ci-après un premier exemple sur un signal stationnaire est donné. Ce signal est composé d'une somme de deux sinusoides de fréquences (50 et 150 Hertz) de même amplitude, dont FFT voir figure (III.1), et d'amplitude différente, dont FFT voir figure (III.2). On constate qu'avec l'analyse de Fourier, les deux signaux sont identiques en raies spectrales et bien sûr les amplitudes diffèrent.

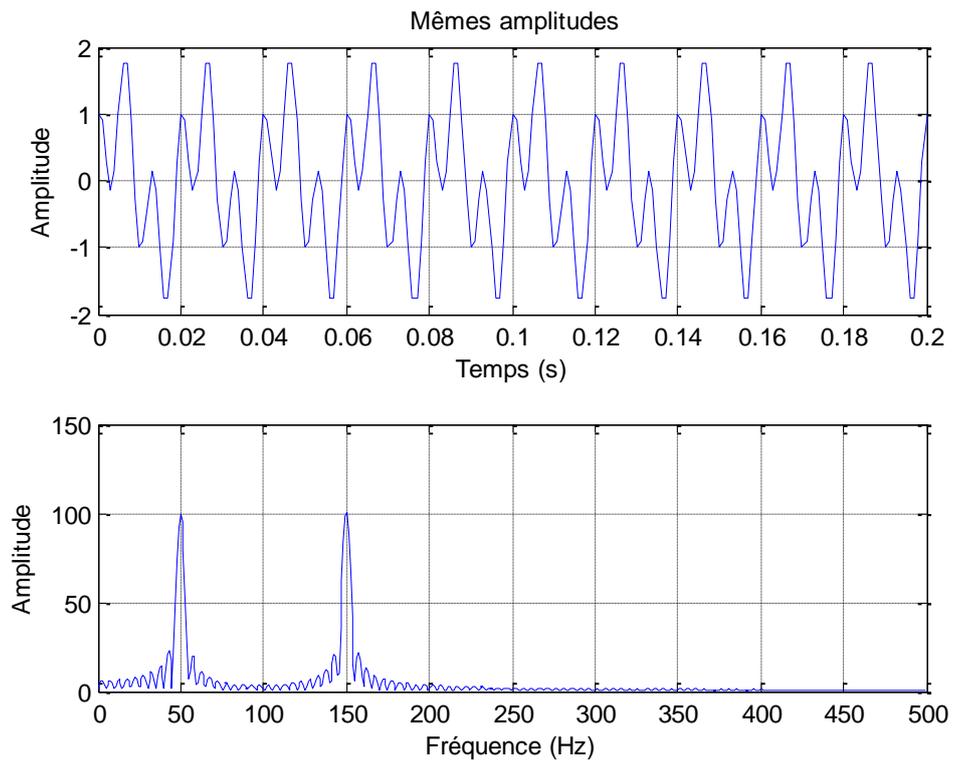


Figure III.1: Représentation temporelle et fréquentielle somme de deux sinusoïdes :
mêmes amplitudes.

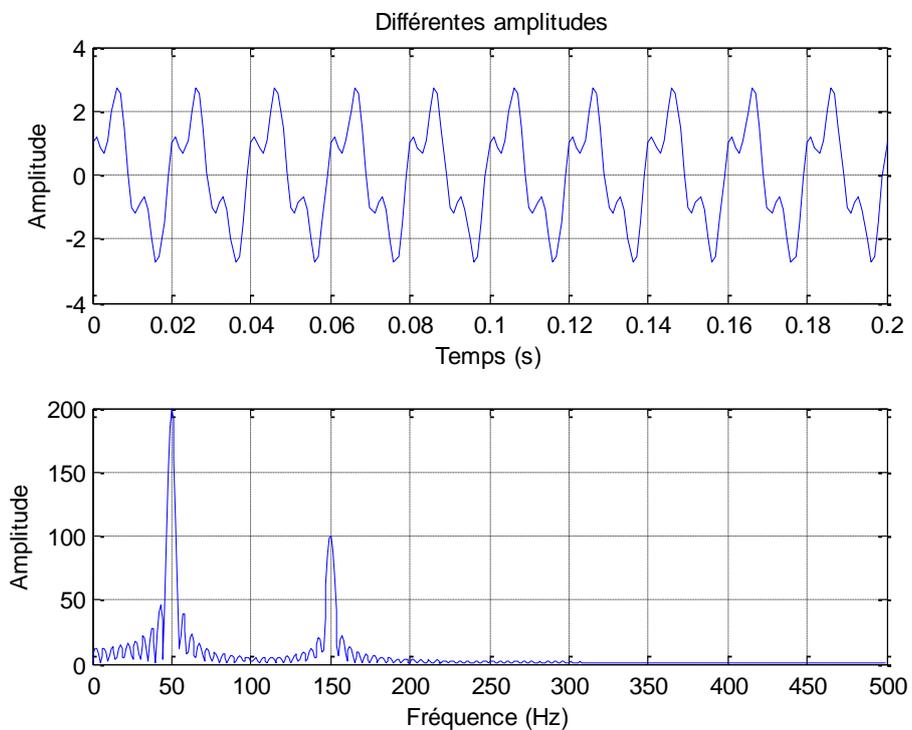
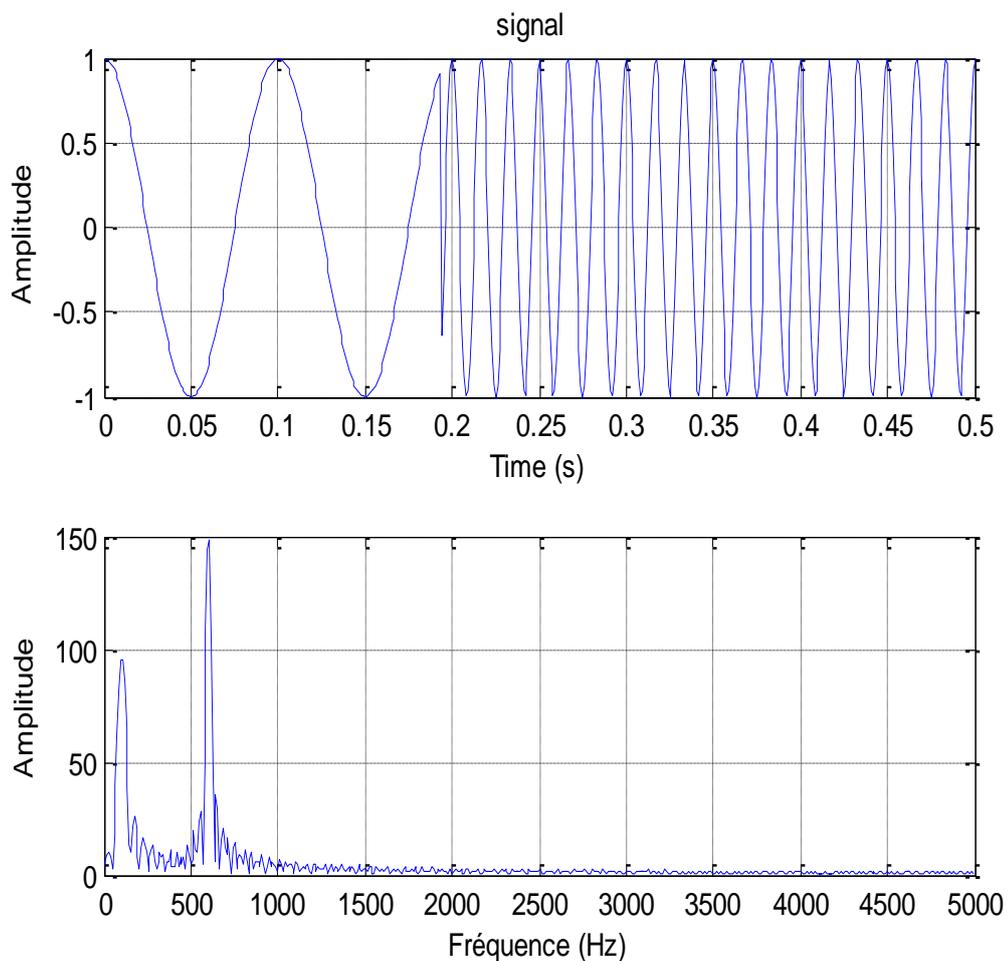
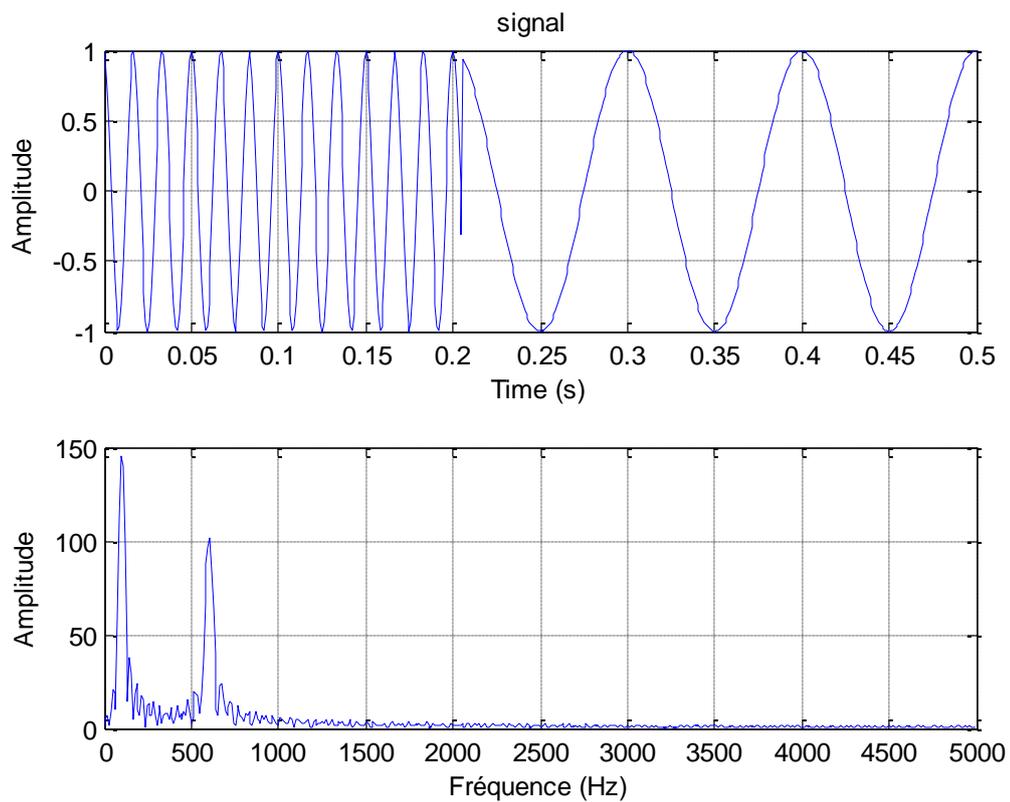


Figure III.2: Représentation temporelle et fréquentielle somme de deux sinusoïdes :
Différentes amplitudes.

Un deuxième exemple sur un signal non stationnaire, changeant l'allure fréquentielle dans le temps, en passant d'une sinusoïde de 30Hz à une autre de 60hz en gardant la même amplitude. On remarque que l'analyse en fréquence est incapable de donner l'information sur la localisation temporelle du changement de régime dans le signal de la figure (III.3).



(a)



(b)

Figure III.3: Perte de localisation temporelle

Il faut définir un intervalle de temps (fenêtre) dans lequel nous pouvons présumer la stationnarité du signal et effectuer la décomposition fréquentielle dans cet intervalle.

III.2.2. La Transformée De Fourier A Court Terme (TFCT)

La transformée de Fourier à court terme (TFCT), ou transformée de Fourier locale (en anglais Short-Time Fourier Transform (STFT)) ou encore transformée de Fourier à fenêtre glissante est introduite pour l'étude des signaux non stationnaire c'est à dire les signaux qui évoluent dans le temps.

Cette méthode Consiste à associer à un signal non stationnaire une suite de transformées de Fourier à court terme STFT en essayant d'adapter les fenêtres d'observation successives aux variations de structure du signal de telle sorte que les hypothèses de stationnarité, soient localement satisfaites.

Il s'agit de calculer la transformée de Fourier du signal temporel découpée en morceaux. Multiplication du signal $x(t)$ par une fenêtre glissante $h(t - b)$ (réelle) et calcul de la transformée de Fourier de ce produit.

$$F(f, T) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)h(t - T)e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{III.3})$$

la STFT décompose le signal dans le domaine temporel en deux dimensions temps et fréquence (f, T) .

Le but de l'analyse temps fréquence est d'offrir une description plus informative du signal révélant la variation temporelle de son continu fréquentiel.

III.3. Modélisation Des Défauts

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

$$F(\theta, \dot{\theta}, \tau, t) = \beta(t - T)f(\theta, \dot{\theta}, \tau) \quad (\text{III.4})$$

$F(\theta, \dot{\theta}, \tau, t) \in R^n$: Représente la dynamique du défaut.

$\beta(t - T) \in R^{n \times n}$: Traduit l'apparition ou pas du défaut considéré.

T : C'est l'instant où le défaut se produit.

$$\beta(t - T) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < T \\ 1 & \text{si } t \geq T \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

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

$$f_m(\theta, \dot{\theta}, \tau, t) = f_{m\theta}(\theta, \dot{\theta}) + f_{m\tau}(\tau) \quad (\text{III.6})$$

Où $f_{m\theta}(\theta, \dot{\theta})$ et $f_{m\tau}(\tau)$ représentent respectivement les défauts composant et actionneurs. Alors, le modèle du robot, tenant compte des défauts précédents, se met sous la forme :

$$\underbrace{M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + \mu(\theta, \dot{\theta}, \tau, t)}_{\substack{\tau \\ \text{Couples/Forces d'entrée}}} + \underbrace{\beta_m(t-T)[f_{m\theta}(\theta, \dot{\theta}) + f_{m\tau}(\tau)]}_{\text{La dynamique de fautes}} = \quad (\text{III.7})$$

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

| Défaut | Modèle |
|----------------------------------|--|
| Frottements secs (coulomb) | $f(\dot{\theta}) = \alpha \text{sign}(\dot{\theta})$ |
| Frottement visqueux | $f(\dot{\theta}) = \alpha(\dot{\theta})$ |
| Défauts dépendant de la position | $f(\theta) = k_f \sin(w_0 + \varphi)$ |
| Défauts dépendant de la vitesse | $f(\theta) = [\alpha_0 + \alpha_1 e^{-\beta \dot{\theta} }] \text{sign}(\dot{\theta})$ |
| Défauts électriques | $f(\tau) = \alpha\tau \quad 0 \leq \tau \leq 1$ |

Tableau III.1 : Exemples de modèles de défauts composants et électriques [20].

III.4. Commande PID du ROBOT SCARA

Dans [2], le problème de la commande d'un robot manipulateur peut être formulé comme la détermination de l'évolution des forces généralisées (forces ou couples) que les actionneurs doivent exercer pour garantir l'exécution de la tâche tout en satisfaisant certains critères de performance. Différentes techniques sont utilisées pour la commande des bras manipulateurs. La conception mécanique du bras manipulateur a une influence sur le choix du schéma de commande. Un robot manipulateur est une structure mécanique complexe dont les inerties par rapport aux axes des articulations varient non seulement en fonction de la charge mais aussi en fonction de la configuration, des vitesses et des accélérations.

Dans cette étude, la commande du robot manipulateur SCARA, s'effectue à l'aide d'une loi de commande (figure III.3), 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).

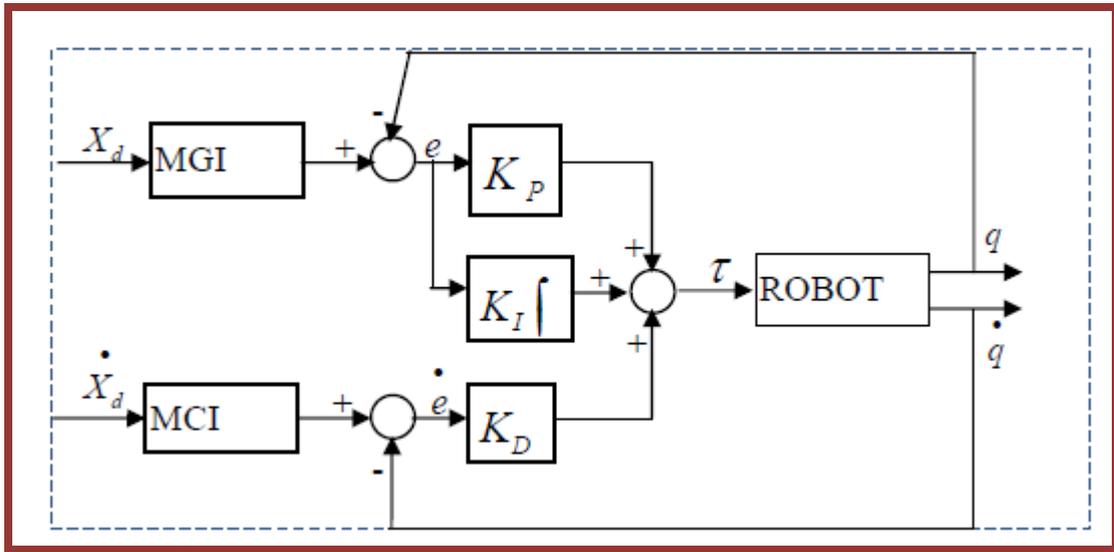


Figure III.4 : Commande PID.

Donc l'équation du couple s'écrit :

$$\tau = K_P(\theta_d - \theta) + K_D(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_I \int (\theta_d - \theta) dt \quad (\text{III.8})$$

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

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

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

Vecteur de l'erreur de position : $(\theta_d - \theta)$

Vecteur de l'erreur de vitesse : $(\dot{\theta}_d - \dot{\theta})$

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

Conclusion :

Beaucoup de méthodes d'analyse du signal ont été proposées pour la diagnostique de défaut, parmi ces méthodes on trouve FFT (FAST FOURIE TRANSFORM), une des méthodes les plus utilisées et les mieux établies. Malheureusement, les méthodes basées sur la FFT ne sont pas appropriées à l'analyse des signaux non-stationnaires et ne peuvent pas indiquer l'information inhérente.

L'analyse en fréquence est incapable de donner l'information sur la localisation temporelle du changement de régime dans le signal, d'où elle est remplacée par l'analyse des signaux dans le domaine temps fréquence (STFT).

Chapitre IV

Tests et validation

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous exposerons les résultats de la méthode adoptée pour réaliser le diagnostic sur le bras manipulateur SCARA à 2ddl. Des simulations ont été effectuées sous l'environnement Matlab/Simulink. Dans cette partie de simulation nous présenterons une analyse détaillée sur les performances du bloc de détection des défauts appliqué à un bras manipulateur commandé par un PID, la boucle de correction du robot SCARA et décrite dans le chapitre 2.

IV.2 Boucle De Correction DU ROBOT SCARA

La boucle de correction du robot SCARA et décrite dans le chapitre 2.

La figure (VI.1), illustre les sorties du système (les vitesses articulaires).

Le choix des paramètres du régulateur (PID) est fait de telle façon que la sortie suit la référence en absence de défauts. Les détails concernant les paramètres de simulation et les défauts considérés peuvent être consultés en annexe A.

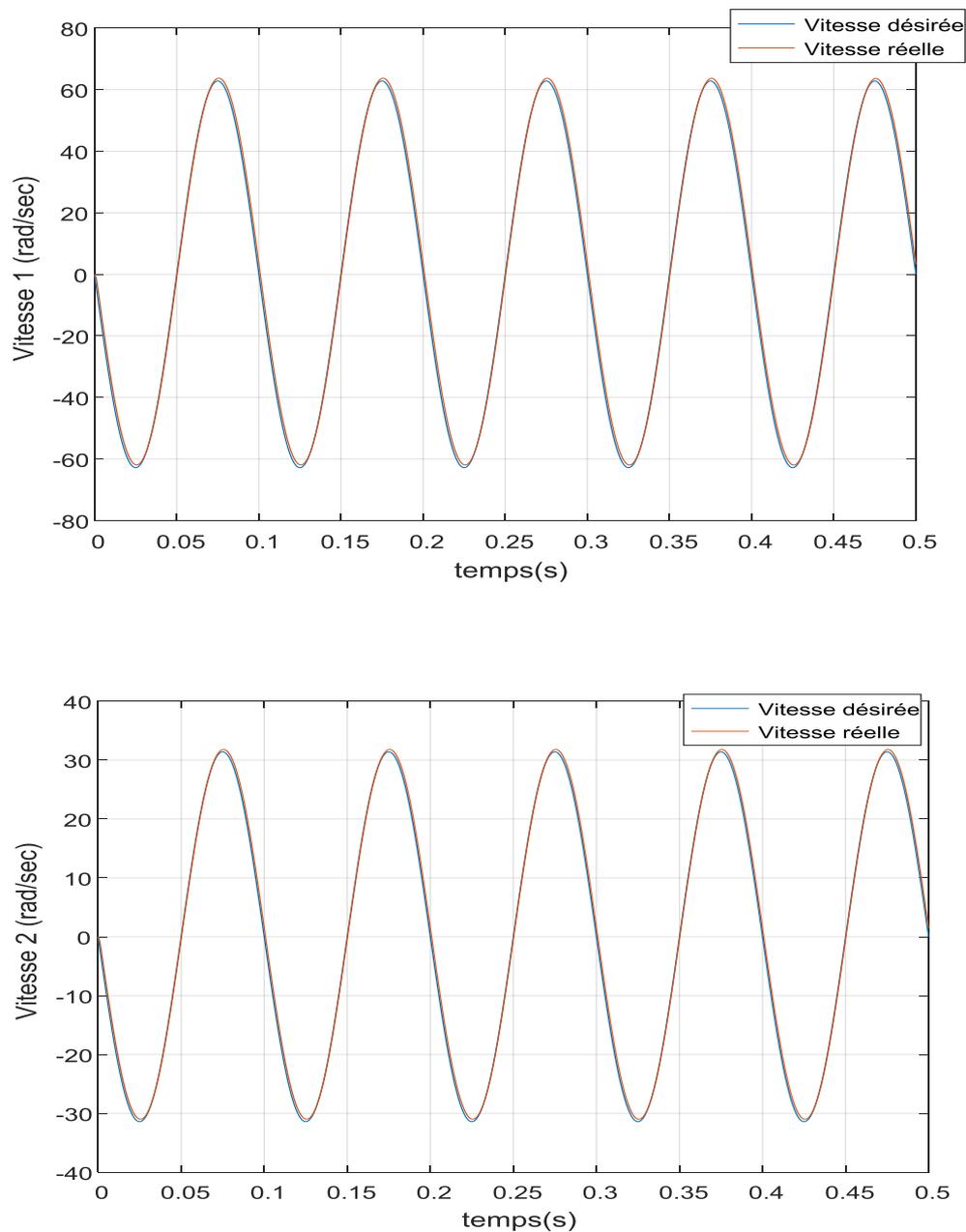
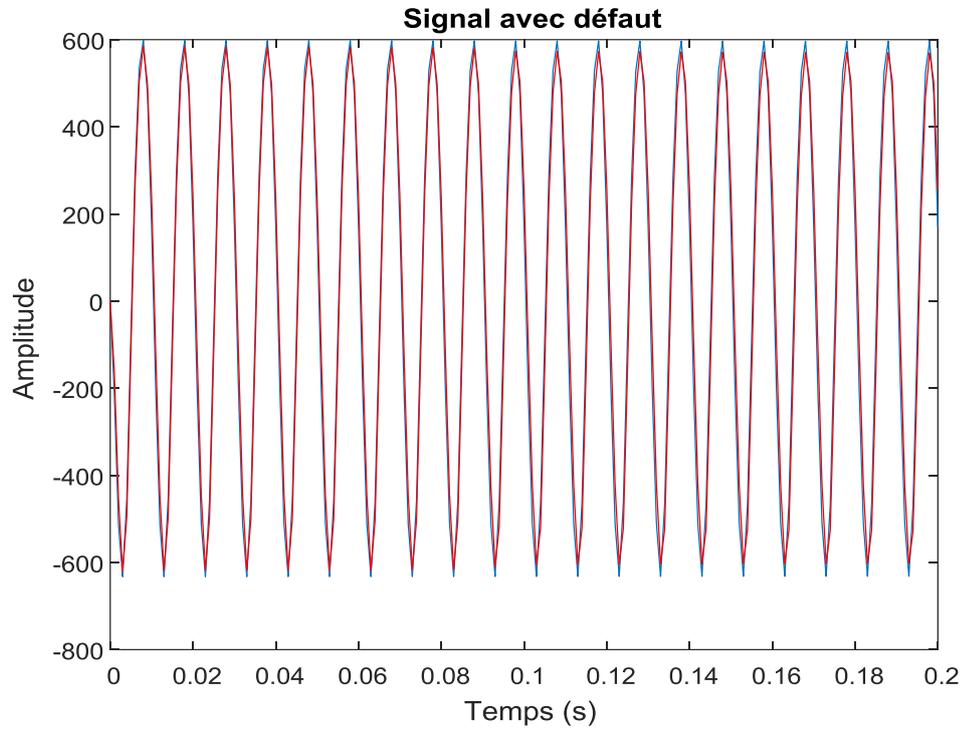


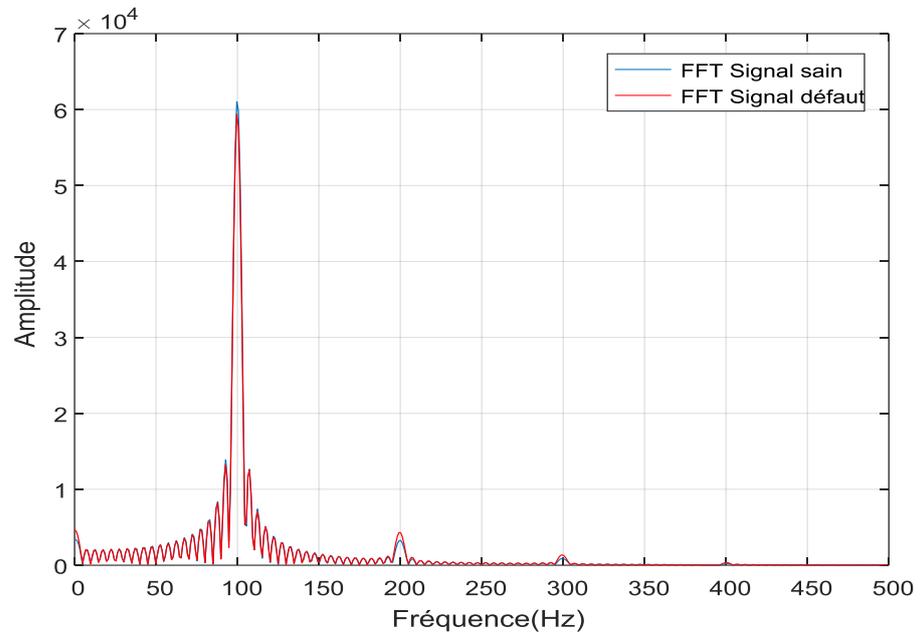
Figure IV.1 : Vitesses articulaires : réelles et désirées.

La figure (Figure IV.1), représente le cas idéal, se traduit par l'absence des défauts et des incertitudes. Nous constatons que les vitesses suivent parfaitement les trajectoires sinusoïdales désirées. Les objectifs de la commande(PID) sont donc achevés.

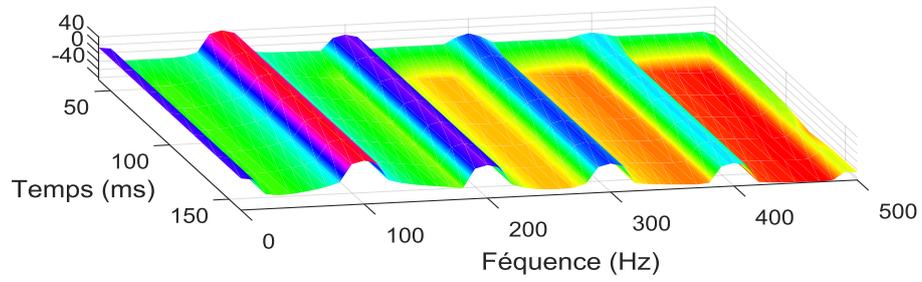
- Introduction de défaut actionneur à $t=0.1s$, avec un affaiblissement de 10% du couple moteur.



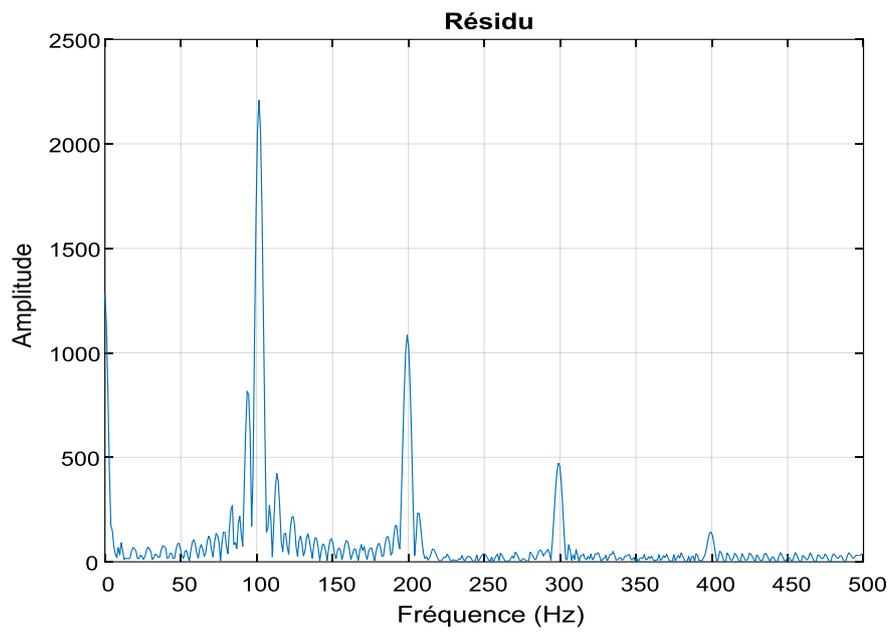
(a) Apparition de défauts actionneurs à $t = 0.1$ sec.



(b)



(c)



(d)

Figure IV.2 : Signal, FFT, STFT et le Résidu pour le signal avec défaut

- Introduction de défaut actionneur à $t=0.08s$, avec un affaiblissement de 30% du couple moteur .

(a) Apparition de défauts actionneurs à $t = 0.09$ sec.

(b)

(c)

(d)

Figure IV.3 : Signal, FFT,STFT et le Résidu pour le signal avec défaut

- Introduction de défaut actionneur à $t=0.09s$, avec un affaiblissement de 50% du couple moteur

(a) : Apparition de défauts actionneurs à $t = 0.09$ sec.

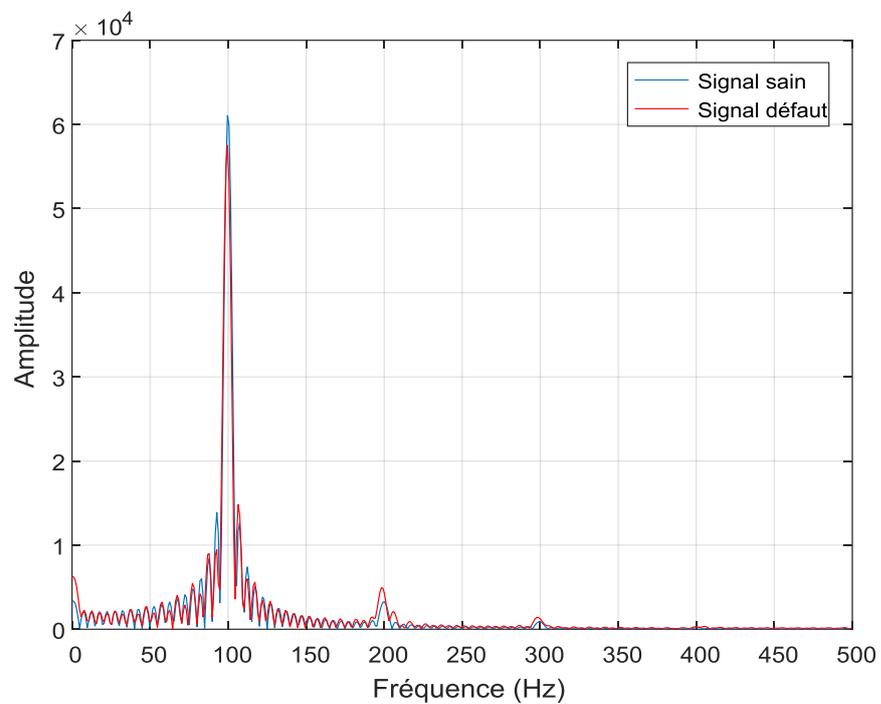
(b)

(c)

Figure IV.4 : Signal, FFT, STFT et le Résidu pour le signal avec défaut

- Introduction de défaut actionneur à $t=0.1s$, avec un affaiblissement de 70% du couple moteur.

(a) : Apparition de défauts actionneurs à $t = 0.1$ sec.



(b)

(c)

(d)

Figure IV.5 : Signal,FFT,STFT et le Résidu pour le signal avec défaut

- Introduction de défaut actionneur à $t=0.09s$, avec un affaiblissement de 90% du couple moteur.

(a) : Apparition de défauts actionneurs à $t = 0.09$ sec.

(b)

(c)

(d)

Figure IV.6 : Signal, FFT, STFT et le Résidu pour le signal ave défaut

IV.3.INTERPRETATIONS ET COMMENTAIRES

Quant aux figures (IV.2) , (IV.3), (IV.4) , (IV.5) et (IV.6), elles illustrent les résultats des simulations effectuées dans le cas d'un système défectueux.

avec un pas d'échantillonnage de 0,1ms Sur une longueur de 0.2s.

- ✓ Les sous figures (IV.2.a) , (IV.3.a), (IV.4.a) , (IV.5.a) et (IV.6.a) :

Le défaut actionneur est introduit à $t=0.1s$, avec un affaiblissement de couple allant de 10% à 90%.

Ces figures illustrent les variations des états du système, dans le cas de l'apparition de défauts actionneurs à $t = 0.1$ sec, nous remarquons que les trajectoires réelles s'écartent notablement zéro à partir de cet instant, indiquant ainsi l'apparition des défauts. Quant aux performances du système de commande, elles se dégradent remarquablement.

.

- ✓ Les sous figures (IV.2.b) , (IV.3.b), (IV.4.b) , (IV.5.b) et (IV.6.b) :Analyse par FFT

Comme est apparu sur les sous figures, une diminution d'amplitude de la fondamentale (100Hz) pour le signal défectueux par rapport à la fondamentale du signal sain , la diminution est d'un pourcentage de 2.7 % jusqu'à 29 %et aussi apparition d'autres harmoniques :

Pour l'harmonique apparue de fréquence 200Hz, un accroissement d'amplitude de 32% jusqu'à 87%.

Pour l'harmonique apparue de fréquence300Hz, un accroissement d'amplitude de pourcentage de,39% jusqu'à 50%.

Les résultats de diminution d'amplitude de la fondamentale peuvent être résumés dans le tableau suivants :

Les résultats de diminution d'amplitude de la fondamentale

Alors on peut conclure que :

- ✓ Pour l'analyse par FFT, la faute doit être importante pour qu'elle soit détectée.
- ✓ La diminution de l'amplitude du fondamental est cause de la génération de nouvelles harmoniques.
- ✓ Les sous figures (IV.2.c) , (IV.3.c), (IV.4.c) , (IV.5.c) et (IV.6.c) : Le spectrogramme 3D

Résultat de la STFT utilisant la fenêtre de Hanning, qui s'étale sur une bande de fréquence de 0 à 500Hz.

Apparition d'autres harmoniques(400Hz, 500Hz,..), qui ne sont pas apparus avec l'analyse par FFT).

L'instant de l'introduction de défaut.

- ✓ Les sous figures (IV.2.d) , (IV.3.d), (IV.4.d) , (IV.5.d) et (IV.6.d) :

Représentent les différentes résidus, c'est la différence entre la FFT de signal sain et la FFT de signal défectueux.

IV.4.Conclusion :

- Le défaut est identifié, par le changement de l'amplitude du fondamentale et la naissance d'autres harmonique.

- l'analyse en fréquence (FFT) est incapable de donner l'information sur la localisation temporelle du changement de régime dans le signal.
- le diagnostic par la méthode d'analyse fréquentielle en utilisant STFT a identifié d'autres fréquences, Contrairement à la première méthode (FFT).
- Ces résultats sont obtenus avec un choix adéquat de la fonction fenêtre et le nombre de points (NFFT).

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur le diagnostic d'un bras manipulateur par approche fréquentielle

La première partie de ce chapitre a été dédiée à la présentation des mots clés les plus importants en diagnostic. Le diagnostic d'un équipement industriel se fait au travers de deux fonctions de base : la *détection* et le *diagnostic* des défaillances. La détection des défaillances a pour rôle de signaler toute situation autre qu'une situation nominale. En d'autres termes, tout ce qui n'est pas normal doit être classé comme anormal. C'est alors que la fonction diagnostic doit *localiser* l'organe défaillant et *identifier* les causes ayant provoqué ces situations de défaillance [7].

L'objectif de deuxième chapitre est de présenter la modélisation des bras manipulateurs. Dans notre cas nous avons utilisé la modélisation dynamique.

Dans le troisième, nous avons présenté la procédure de détection des défauts par analyse fréquentielle : FFT et STFT .

Dans le dernier chapitre, nous avons exposé les résultats des méthodes adoptées pour réaliser le diagnostic sur un bras manipulateur d'un robot SCARA 2ddl .

Comme perspectives, nous suggérons, tout d'abord, abordé le problème de détection de défauts par ondelettes.

La phase de détection et de localisation des défauts, bien qu'elle soit nécessaire, n'est pas suffisante pour garantir la sûreté de fonctionnement. Il est, en effet, indispensable de modifier la loi de commande en temps réel afin de maintenir la stabilité et de garantir au mieux les performances du système (la commande tolérante aux défauts en robotique) .

BIBLIOGRAPHIES

- [1] **M.SAHRAOUI**, « *Etude comparative des méthodes de diagnostic des machines asynchrones* », Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Déc.2010.
- [2] **G. ZWINGELSTEIN**, « *Diagnostic des défaillances : Théorie et pratique pour les systèmes Industriels* », Edition Hermès, 1995
- [3] **A. VILLEMEUR**, « *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels* », Edition EYROLLES, Collection DER-EDF, Volume 67, 1988.
- [4] **F. BOUDJEMAI**, « *Méthodes non-intrusives pour le diagnostic des défauts mécaniques d'une éolienne* », Mémoire Master II Option : Automatique, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2012.
- [5] **A N.ALLALOU**, « *Diagnostic de Défauts par Observateurs Non Linéaires : Application aux Processus Chimique* », Mémoire de Magister, ENP, Alger, 2006.
- [6] **I. BOUCHAREB**, « *Modélisation & Simulation de Défauts D'une Machine Synchrones à Réductance Variable* », Mémoire de Magister, Université Constantine, 2009.
- [7] **S. OUARHLENT** « *diagnostic de pannes dans système robotises* » Université HADJ-LAKHDAR-BATNA. Magister en Electronique Option Robotique (2009)
- [8] **N.BELFARHI** « *Conception d'un outil d'aide a la détection et diagnostic des défaillances dans un système de production* » Université HADJ-LAKHDAR-BATNA Option : Génie Industriel(2012)
- [9] **AIT DAHMANE KAHINA, AIT ZIANE MEZIANE** « *Conception et Réalisation d'un Bras Manipulateur Commandé par API* » Université de KHEMIS MILIANA « *Automatique des systèmes et production* » Option : « Génie électrique ».2015
- [10] **P. FISETTE, H. BUYSE, J.C. SAMIN**, MECA 2732 : *Introduction à la Robotique*, 10 novembre 2004.
- [11] **A. BENALI**, *Robotique et Automatisation Industriel*.
- [12] **PRIEL MARC** « *les robots industriels: caractéristiques, performances et choix* »:Edition AFNOR (1990)
-

[13] **BOUZIANE FATIMA ZOHRA** « *Rétro-conception du bras horizontal de robot manipulateur de la cellule flexible (Tlemcen)*», UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEN Option Ingénierie des systèmes mécaniques productives,(2013)

[14] **CHAAL MEROUANE**, « *Modélisation cinématique d'un robot manipulateur à chaîne continue ouverte* », UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA Option Maintenance Industrielle, (2013)

[15] **A. BENALIA**. "Génération de trajectoires des systèmes non linéaires en présence de contraintes". Conférence GDA 2003, Valenciennes, France.

[16] **J.J. CRAIG**. "Introduction to Robotics: Mechanics and Control". Addison-Wesley, 1989.

[17] **LUH, J., WALKER, M., ET PAUL, R.** "Resolved acceleration control of mechanical manipulators". *IEEE Trans. on Automatic Control (ITAC)*, 25(3):468–474. (1980).

[18] **BAZI .SMAIL** «*Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur*» Université HADJ-LAKHDAR-BATNA. Doctorant en sciences En Electrotechnique (2016)

[19]**S.BELHAMDI**«*diagnostique_des_defauts_de_la_machine_asynchrone_controle_e_par_differentes-technique_de_commandes*» Université HADJ-LAKHDAR-BISKRA. Doctorant en sciences En Electrotechnique (2014)

[20] **V. M. Kmelnitsky**, « *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.

A.1 PARAMETRES DU ROBOTS

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

$$l_1 = 1.0m, l_2 = 1.0m$$

$$m_1 = 1.0Kg, m_2 = 1.0Kg, g = 9.8m/s^2$$

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

A.2 PARAMETRES DE LA COMMANDE PID

L'équation du couple s'écrit :

$$\tau = K_p(\theta_d - \theta) + K_D(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_I \int (\theta_d - \theta) dt \quad (A.1)$$

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

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

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

Vecteur de l'erreur de position : $(\theta_d - \theta)$

Vecteur de l'erreur de vitesse : $(\dot{\theta}_d - \dot{\theta})$

$$K_p = \begin{bmatrix} 900 & 0 \\ 0 & 900 \end{bmatrix}$$

$$K_I = \begin{bmatrix} 2000 & 0 \\ 0 & 2000 \end{bmatrix}$$

$$K_D = \begin{bmatrix} 2500 & 0 \\ 0 & 2500 \end{bmatrix}$$

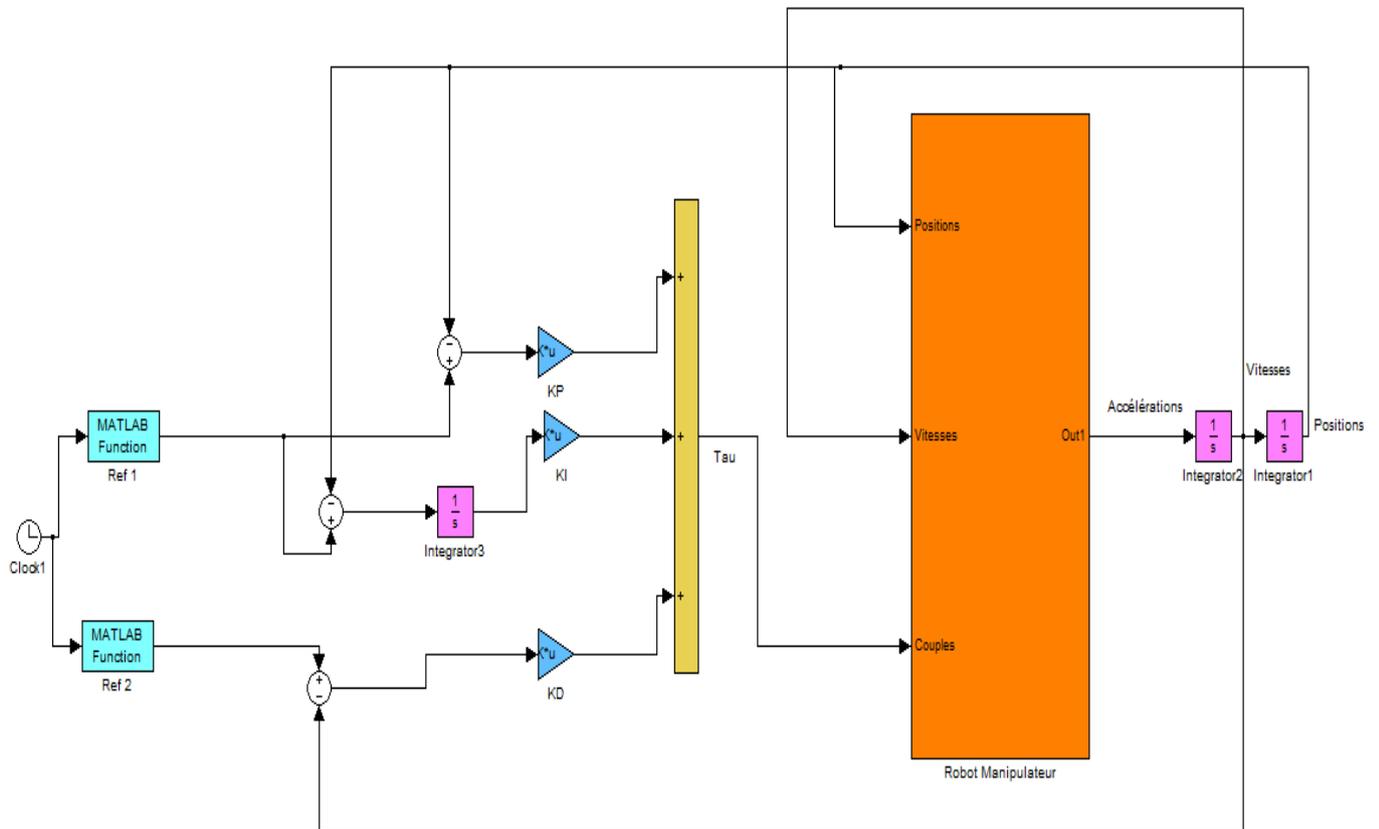


Figure A.1: La commande de Bras Manipulateur (SAIN) par PID

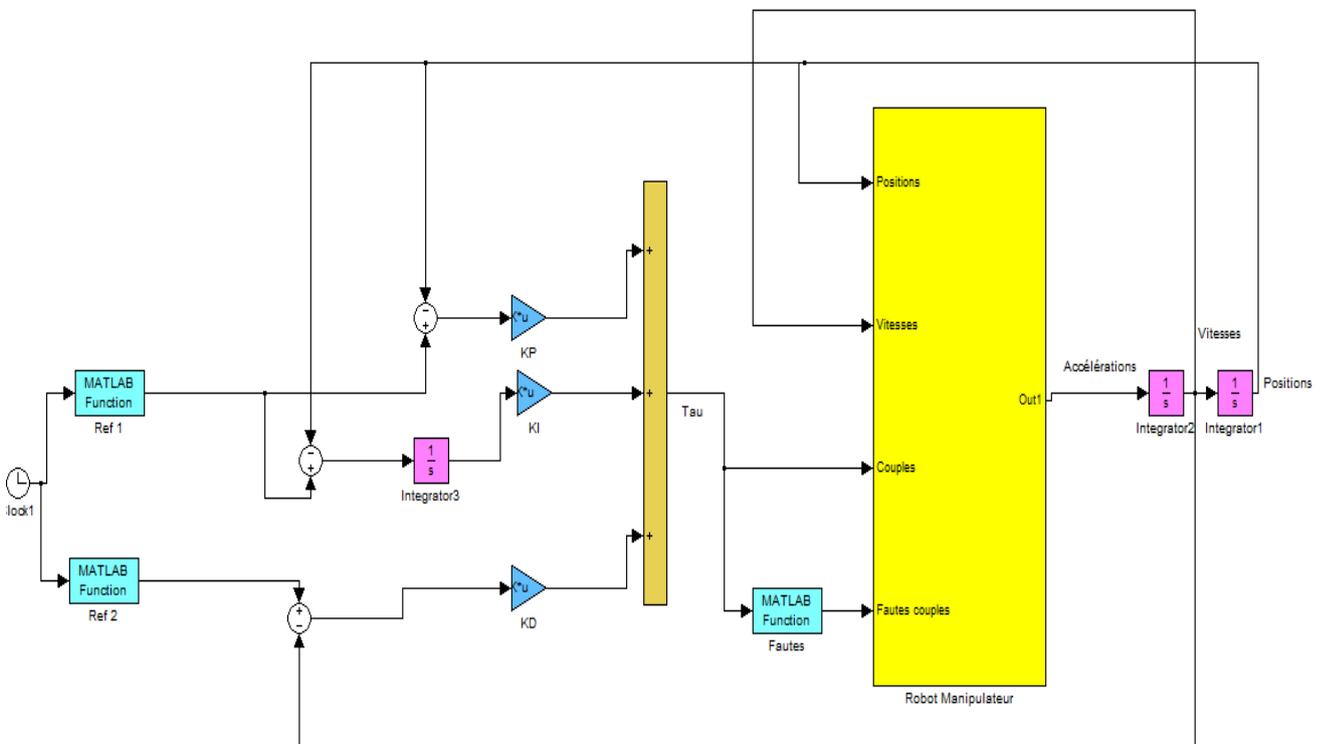


Figure A.2: La commande de Bras Manipulateur (Avec Fautes) par PID