

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



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

Département du Génie Electrique

Spécialité Automatique

*Projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme  
d'ingénieur d'état en Automatique*

# **DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE**

Réalisé par :

**Mr.MEGHNOUS Ahmed Redha**

**Mr.MEKRACHE Mohammed Amine**

Proposé et dirigé par :

**Mr.M.S.BOUCHERIT**

**Mr.M.TADJINE**

**Juin 2009**

# REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier nos promoteurs Mr *M.S.BOUCHERIT* et Mr *M.TADJINE* pour leurs précieux conseils, leur aide inestimable et la confiance qu'ils nous ont accordée et qui nous a permis de mener à terme ce travail.

Nous remercions les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre travail.

Nous remercions également tous les professeurs de la spécialité Automatique de l'ENSP pour leur aide, leurs conseils et leur compréhension durant notre cursus.

Merci à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce projet.

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes très chers parents*

*A mes frère et sœurs*

*A ma famille*

*A tous mes Amis*

*Redha*

# *Dédicaces*

A mes très chers parents

A toute ma famille

A toute la promo ENP 2009

A mes amis

A tous ceux qui ont su croire en moi

A tous ceux qui me sont chers

Je dédie ce modeste travail

*Amine*

## TABLE DES MATIERES

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : <i>Introduction au diagnostic des défauts</i></b> .....	4
Introduction .....	5
I.1 Définitions et concepts .....	5
I.2. Critère de performance d'un système de diagnostic .....	6
I.3 Procédure de détection et d'isolation des défauts.....	6
I.4 Les différents types de défauts .....	7
I.5 Classification des méthodes de diagnostic .....	8
I.5.1 Méthodes de diagnostic sans modèle .....	9
I.5.1.1 Surveillance avec outils statistiques.....	9
I.5.1.1.1 Test de franchissement de seuils .....	10
I.5.1.1.2 Test de moyenne.....	10
I.5.1.1.3 Test de variance.....	10
I.5.1.2 Surveillance par reconnaissance des formes.....	11
I.5.1.2.1 Reconnaissance des formes par une approche floue .....	11
I.5.1.2.2 Reconnaissance des formes par réseaux de neurones .....	11
I.5.2 Méthodes de diagnostic avec modèle.....	11
I.5.2.1 Les méthodes basées sur l'approche mono-signal .....	12
I.5.2.1.1 Redondances physiques.....	12
I.5.2.1.2 Analyse spectrale.....	12
I.5.2.2 L'approche multi-signaux ou redondances analytiques .....	12
I.5.2.3 Espace de parité .....	13
I.5.2.4 Observateurs.....	13
I.5.2.5 Estimation paramétrique.....	14
Conclusion.....	14
<b>Chapitre II : <i>Défauts de la machine asynchrone</i></b> .....	15
Introduction .....	16
I.1 La constitution de la machine asynchrone.....	16

I.1.1 Le stator .....	17
II.1.2 Le rotor .....	17
II.1.2.1 Le rotor bobiné .....	18
II.1.2.2 Le rotor à cage d'écureuil .....	18
II.1.3 Les organes mécaniques .....	19
II.2 Les défaillances de la machine asynchrone .....	19
II.2.1 Les causes des défauts .....	19
II.2.2 Les défauts d'ordre électrique .....	19
II.2.2.1 Les Défauts statoriques .....	20
II.2.2.1.1 Les courts circuits internes .....	20
II.2.2.1.2. Les isolations électriques .....	20
II.2.2.1.3. Les décharges partielles .....	20
II.2.2.1.4. Défauts de circuit magnétique .....	21
II.2.2.2 Les défauts rotoriques .....	21
II.2.2.2.1 Rupture de barres .....	21
II.2.2.2.2 Rupture d'anneaux .....	21
II.2.3 Les défauts d'ordre mécaniques .....	22
II.2.3. 1 Excentricité statique et dynamique .....	22
II.2.3.2 Roulements à billes et flasques .....	22
II.2.3.3 La dissymétrie du rotor .....	23
II.2.4 Défauts divers .....	23
Conclusion .....	23
<b>Chapitre III : Modélisation et Discrimination des défauts</b> .....	<b>24</b>
Introduction .....	25
III.1. Hypothèses simplificatrices .....	25
III.2 Les équations électriques .....	26
III.3 Les équations mécaniques .....	26
III.4 Le modèle triphasé-triphasé .....	27
III.5 Modélisation en vue du diagnostic .....	28
III.6 Simulation .....	29
III.7 Discrimination des défauts .....	31
III.7.1 Défaut statorique .....	31
III.7.2 Défaut rotorique .....	32

III.8 Validation par analyse spectrale.....	34
III.8.1 Défaut rotorique.....	36
III.8.2 Défaut statorique.....	36
Conclusion.....	37
<b>Chapitre IV : Diagnostic des défauts à base d'observateurs</b> .....	<b>38</b>
Introduction.....	39
IV.1. Principe de l'observateur.....	39
IV.1.1 Observateurs pour les systèmes linéaires.....	39
IV.1.2 Observateurs pour les systèmes non linéaires.....	41
IV.2 Génération des résidus.....	42
IV.2.1 Problème fondamental de génération des résidus.....	42
IV.2.2 Découplage.....	42
IV.2.3 Structuration des résidus.....	43
IV.2.3.1 Structure d'observateur simplifié (SOS).....	43
IV.2.3.2 Structure d'observateurs dédiés (DOS).....	44
IV.2.3.3 Structure d'observateurs généralisés (GOS).....	44
IV.3 Méthode d'évaluation des résidus.....	45
IV.3.1 Choix de seuil approprié.....	45
IV.3.2 Evaluation de résidu en utilisant l'approche floue.....	46
IV.3.2.1 Stratégie de fuzzification.....	46
IV.3.2.2 Mécanisme d'inférence.....	46
IV.3.2.3 Défuzzification.....	47
IV.3.3 Seuil adaptatif flou.....	47
IV.4 Observabilité de la machine asynchrone.....	47
IV.5 Application.....	49
IV.5.1 Observateur par modes glissants.....	49
IV.5.1.1 Présentation.....	49
IV.5.1.2 Evaluation des résidus.....	51
IV.5.2 Filtre de Kalman.....	55
IV.5.2.1 Présentation.....	55
IV.5.2.2 Evaluation des résidus.....	57
IV.6 Comparaison entre les deux approches.....	61
IV.7 Comparaison avec l'approche utilisant le modèle de Park.....	61

Conclusion .....	63
<b>Conclusion générale</b> .....	64
<b>Bibliographie</b> .....	67
<b>Annexe A</b> .....	I
<b>Annexe B</b> .....	II
<b>Annexe C</b> .....	IV

## NOTATIONS

$v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}$	Tensions statoriques
$v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}$	Tensions rotoriques
$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$	Courants statoriques
$i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$	Courants rotoriques
$\varphi_{sa}, \varphi_{sb}, \varphi_{sc}$	Flux rotoriques
$\varphi_{ra}, \varphi_{rb}, \varphi_{rc}$	Flux rotoriques
$R_{sa}, R_{sb}, R_{sc}$	Résistances statoriques
$R_{ra}, R_{rb}, R_{rc}$	Résistances rotoriques
$L_{sa}, L_{sb}, L_{sc}$	Inductances statoriques
$L_{f_{sa}}, L_{f_{sb}}, L_{f_{sc}}$	Inductances de fuite statoriques
$L_{ra}, L_{rb}, L_{rc}$	Inductances rotoriques
$L_{f_{ra}}, L_{f_{rb}}, L_{f_{rc}}$	Inductances de fuite rotoriques
$L_m$	Inductance magnétisante
$f$	Coefficient de frottement
$C_r$	Couple résistant
$J$	Inertie de la machine
$\omega$	Vitesse angulaire
$\theta$	Position angulaire
$p$	Nombre de paires de pôles
$g$	Glissement
$f_s$	Fréquence de synchronisme
$f_d$	Fréquence de défaut
$N$	Nombre d'échantillons

## LISTE DES FIGURES

- Fig.1.1.Procédure de détection et d'isolation des défauts.
- Fig.1.2. Méthodes de diagnostic des défauts
- Fig.1.3.Schéma représentant la redondance physique
- Fig.1.4. Principe général du diagnostic à base de modèles analytiques
- Fig.2.1.Le stator de la machine asynchrone
- Fig.2.2.Le rotor bobiné
- Fig.2.3.La cage d'écureuil
- Fig.2.4.Le rotor à cage
- Fig.2.5.Excentricité statique et dynamique
- Fig.3.1.Présentation du modèle triphasé
- Fig.3.2.Représentation du rotor
- Fig.3.3.Courant statorique d'une phase
- Fig.3.4.Courant rotorique
- Fig.3.5.Vitesse angulaire
- Fig.3.6 Les courant dans le cas d'un défaut sur la phase 1
- Fig.3.7 La vitesse dans le cas d'un défaut statorique
- Fig.3.8 Le courant statorique dans le cas d'un défaut rotorique
- Fig.3.9 Le courant rotorique dans le cas d'un défaut rotorique
- Fig.3.10 La vitesse dans le cas d'un défaut rotorique
- Fig.3.11 Spectre du courant statorique : moteur sain
- Fig.3.12 Spectre du courant statorique : moteur sain (agrandissement)
- Fig.3.13 Spectre du courant statorique : défaut rotorique
- Fig.3.14 Spectre du courant statorique : défaut statorique
- Fig.4.1.Principe d'un observateur d'état
- Fig.4.2. Structure d'observateur simplifié
- Fig.4.3.Structure d'un observateur dédié
- Fig.4.4.Structure d'un observateur généralisés
- Fig.4.5 Seuil de détection adaptatif
- Fig.4.6.Courant statorique
- Fig.4.7.Erreur d'observation

Fig.4.8.Résidus en absence de défauts et perturbations

Fig.4.9.Résidus en présence de perturbations

Fig.4.10.Résidus en présence d'un défaut statorique sur la phase 1

Fig.4.11.Résidus en présence d'un défaut statorique sur la phase 2

Fig.4.12.Résidus en présence d'un défaut statorique sur la phase 3

Fig.4.13.Résidus en présence d'un défaut rotorique

Fig.4.14. Courant statorique

Fig.4.15. Erreur d'observation

Fig.4.16.Résidus en absence de défauts et perturbations

Fig.4.17.Résidus en présence de perturbations

Fig.4.18.Résidus en présence d'un défaut statorique sur la phase 1

Fig.4.19.Résidus en présence d'un défaut statorique sur la phase 2

Fig.4.20.Résidus en présence d'un défaut statorique sur la phase 3

Fig.4.21.Résidus en présence d'un défaut rotorique

Fig.B.1 Erreur d'observation : Défaut statorique

Fig.B.2 Erreur d'observation : Défaut rotorique

Fig.C.1 Erreur d'observation : Défaut statorique

Fig.C.2 Erreur d'observation : Défaut rotorique

Tab.3 Simulation d'un défaut statorique

Tab.4.1 Table des signatures (Observateur en mode glissant)

Tab.4.2 Table des signatures (Filtre de Kalman étendu)

Tab.4.3 Table des signatures : Observateur par modes glissants (modèle de Park)

# **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Le moteur asynchrone ou moteur à induction est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple et robuste facile à construire.

Certaines utilisations de la machine asynchrone ne tolèrent pas les pannes intempestives. Ces pannes peuvent être dues aux moteurs et être d'origine mécanique ou électrique et magnétique d'où la nécessité d'un système de diagnostic capable de détecter les défauts ce qui permet à l'opérateur de prendre une décision (arrêter le système, passer à une commande tolérante...) avant l'occurrence de la panne .

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses, elles se répartissent en deux grandes familles : méthodes sans modèle, et méthodes avec connaissance à priori d'un modèle physique. Dans la première famille l'approche la plus classique, est celle basée sur l'analyse des vibrations. Récemment de nouvelles approches, fondées sur les nouvelles techniques de l'intelligence artificielle sont développées. Dans la deuxième famille, on trouve plusieurs méthodes : le traitement du signal, l'estimation paramétrique, l'espace de parité et l'approche basée sur les observateurs.

L'efficacité de la surveillance réalisée par des observateurs réside dans le choix des paramètres significatifs. La détection des défaillances se fait en comparant l'évolution de l'écart entre le modèle de la machine et le processus réel. Le diagnostic à base d'observateurs de la machine asynchrone à cage d'écureuil fait l'objet de ce travail.

Le premier chapitre présente les définitions et les concepts du diagnostic , la procédure de détection des défauts et les critères de performances à satisfaire. Les différents défauts : capteur, actionneur et composant, ainsi les différentes méthodes de diagnostic à base de modèle et sans modèle sont présentés dans ce même chapitre.

La constitution de la machine et les caractéristiques de ces organes sont illustrés dans le seconde chapitre. Les différents défauts, leurs natures leurs causes et leurs impacts sur la machine sont détaillés dans ce deuxième chapitre.

Le diagnostic à base d'observateurs fait partie des méthodes à base de modèle de connaissance d'où la nécessité d'une bonne modélisation pour bien décrire le comportement du système. Nous présentons dans le troisième chapitre le modèle triphasé-triphasé de la machine. La discrimination des défauts et sa validation par une analyse spectrale en utilisant une FFT ont été faites dans ce chapitre.

Dans le dernier chapitre, nous présentons le diagnostic des défauts de la machine asynchrone en utilisant deux observateurs ; l'observateur par modes glissants et le filtre de Kalman. Quatre résidus sont synthétisés avec des seuils de détection pour détecter et localiser les défauts au niveau du stator et du rotor. Une comparaison entre les deux approches est envisagée par la fin.

*Chapitre I*

**INTRODUCTION AU  
DIAGNOSTIC DES DEFAUTS**

## **Chapitre I : *Introduction au diagnostic des défauts***

---

### **Introduction**

Le mot diagnostic peut avoir plusieurs interprétations selon le contexte et le domaine d'application. Le diagnostic des procédés industriels a pour objet de trouver la cause d'une défaillance ou d'un défaut. La définition de ce dernier, adoptée par les instances internationales de normalisation (AFNOR, CEI), est la suivante : « Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test».

En général, lorsqu'on parle de diagnostic des défauts, on se réfère à la procédure de détection et d'isolation de ces derniers, que l'on retrouve souvent sous le nom: FDI (Fault Detection and Isolation, en anglais). Le rôle d'une telle procédure est de fournir une information sur l'apparition d'un défaut et sa provenance le plus rapidement possible. Les méthodes de détection et de localisation des défauts ont connu un essor considérable depuis le début des années 70. [24]

Dans ce chapitre, nous allons représenter l'état de l'art du diagnostic des défauts, la procédure de détection, ainsi les critères de robustesse d'un système de diagnostic et à la fin les différentes approches proposées dans ce domaine.

### **I.1 Définitions et concepts**

- **Une anomalie** est une particularité non conforme à la loi naturelle ou logique.
- **Une défaillance** est une anomalie de fonctionnement au sein d'un système physique.
- **Une panne** est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance.
- **Un défaut** est une anomalie de comportement au sein du système. Ce concept est important dans les opérations de surveillance pour la conduite et la maintenance des processus industriels. Tout écart entre la caractéristique observée et la caractéristique de référence est considéré comme étant un défaut. Il est donc clair qu'une défaillance conduit à un défaut. Mais un défaut n'induit pas nécessairement une défaillance. En effet, le dispositif peut conserver son aptitude à accomplir sa tâche principale si les

défauts n'ont pas d'impacts sur cette tâche. L'art du diagnostic consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il conduise à un état de défaillance donc de panne.

- **Une perturbation** consiste en tout phénomène conçu comme normal influençant un processus représenté par un modèle de référence.
- **Un résidu** est un signal conçu comme un indicateur d'anomalies fonctionnelles ou comportementales, sensiblement nul en absence de défauts et non nul en leur présence.
- **Un symptôme** est un caractère distinctif d'un état fonctionnel ou comportement anormal. [24]

## **I.2. Critère de performance d'un système de diagnostic**

Un système de diagnostic doit vérifier un ensemble de caractéristiques. Il doit satisfaire les critères:

- **La détectabilité**

Pouvoir détecter une défaillance particulière

- **La localisation**

C'est l'aptitude de la procédure de détection à distinguer (c'est à dire localiser) plusieurs fautes sous réserve que ces fautes soit détectables.

- **La sensibilité**

Elle caractérise l'aptitude de la procédure à détecter des fautes d'amplitude donnée. Elle dépend surtout de l'amplitude relative du bruit de mesure par rapport à celle du défaut à détecter.

- **La robustesse**

C'est l'aptitude de la procédure à détecter les fautes indépendamment des erreurs de modèle du processus et des perturbations extérieures.

- **La rapidité de la détection**

Elle se définit d'elle-même ; c'est un impératif à prendre en compte lorsque le diagnostic doit être établi en temps réel. [2]

## **I.3 Procédure de détection et d'isolation des défauts**

La procédure de détection et d'isolation des défauts passe par trois étapes essentielles :

**a. La détection** : C'est l'étape qui décide si le système est soumis à un défaut ou pas. Elle consiste dans la plus part des cas à générer le vecteur résidu, qui est nul en fonctionnement

normal et est comparé en ligne aux signatures de pannes. La détection est réalisée en vérifiant le dépassement d'un seuil par les résidus.

**b. La localisation :** Cette étape permet de localiser le défaut et donc de déterminer quelle partie du système est affectée par l'anomalie.

**c. L'identification :** L'ampleur et le type des défauts sont estimés dans cette phase. [24]

Ces étapes sont résumées sur la figure suivante :

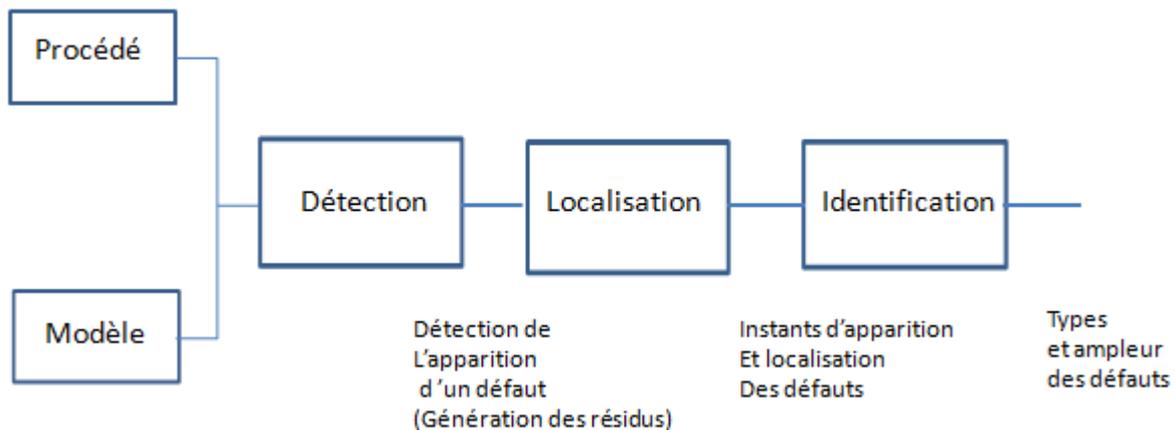


Fig.1.1.Procédure de détection et d'isolation des défauts.

## I.4 Les différents types 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 localisation, définissant alors des types de défauts.

- **Les défauts actionneurs**

Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative et détériorent le signal d'entrée du système. Ils représentent une perte totale (défaillance) ou partielle d'un actionneur agissant sur le système. Un exemple de perte totale d'un actionneur est un actionneur qui est resté "collé" sur une position entraînant une incapacité à commander le système par le biais de cet actionneur. Les défauts actionneurs partiels sont des actionneurs réagissant de manière similaire au régime nominal mais en partie seulement, c'est-à-dire avec une certaine

dégradation dans leur action sur le système.(perte de puissance d'un moteur, fuite dans un vérin, . . .).

- **Les défauts capteurs**

Ce type de défaut est la cause d'une mauvaise image de l'état physique du système. Un défaut capteur partiel produit un signal avec plus ou moins d'adéquation avec la valeur vraie de la variable à mesurer. 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 total produit une valeur qui n'est pas en rapport avec la grandeur à mesurer  $(0, \infty)$ .

- **Les défauts composants ou systèmes**

Ce type de défaut provient du système lui-même ; bien souvent les défauts n'appartenant pas à un défaut capteur ou actionneur sont classés de manière arbitraire dans cette catégorie. Néanmoins, un défaut composant résulte de la casse ou de l'altération d'un composant du système réduisant les capacités de celui-ci à effectuer une tâche. En pratique, ceci revient à considérer une modification des caractéristiques du système proprement dit (la CTN : résistance à Coefficient de Température Négatif, d'une chaufferie est cassée, un roulement est altéré, . . .). [26]

## **I.5 Classification des méthodes de diagnostic**

Les méthodes de diagnostic se répartissent en deux grandes classes, selon qu'on dispose ou non d'un modèle du processus à surveiller. La première classe se compose essentiellement de deux techniques : méthodes de redondance physique et analytique et méthodes d'estimation paramétrique. La deuxième classe se divise en deux catégories : méthodes utilisant des outils statistiques et méthodes de reconnaissance des formes. Les tests sur les signaux d'acquisition, qui sont établis par les outils statistiques assurent la fonction détection de défaillances. Mais les techniques de surveillance par reconnaissance des formes sont capables de détecter et de diagnostiquer les défaillances.

La figure I.2 présente un panorama des différentes méthodes de diagnostic :

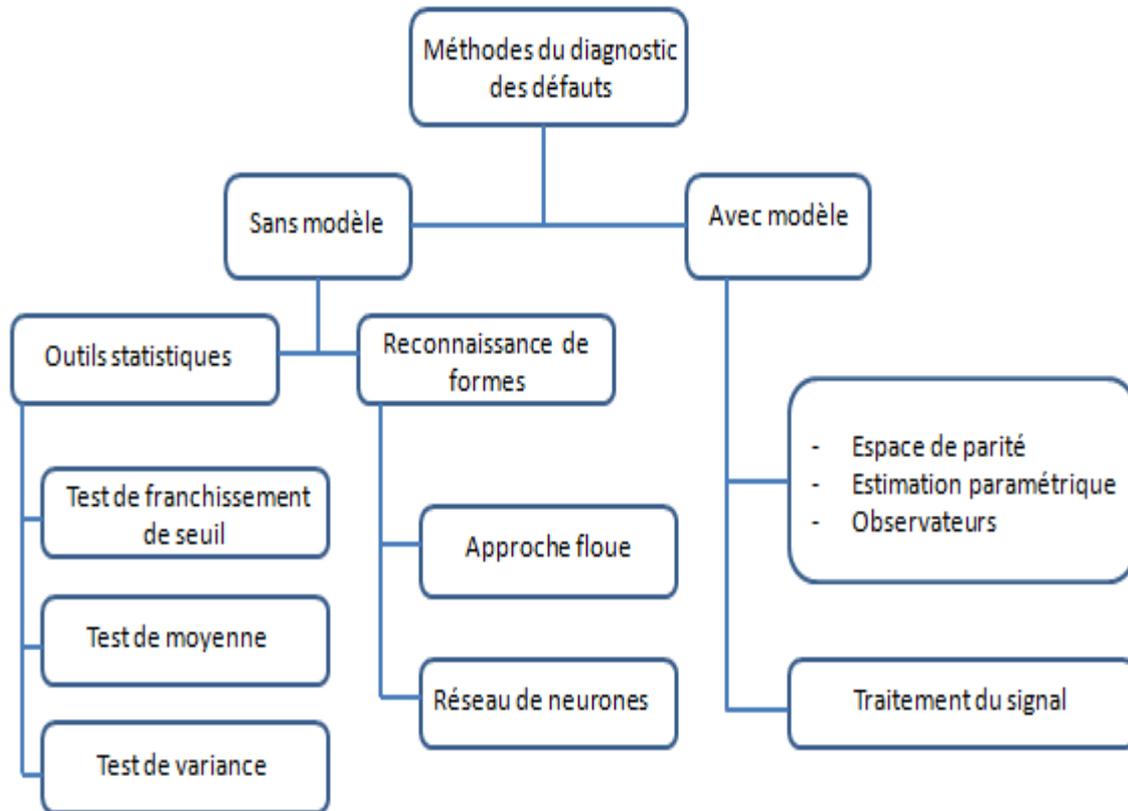


Fig.1.2. Méthodes de diagnostic des défauts

## I.5.1 Méthodes de diagnostic sans modèle

Il est souvent difficile de modéliser la dynamique des processus de manière exacte. Suite à une complexité ou à de nombreuses reconfigurations intervenants durant le processus de production. Deux types de surveillance opérationnelle sont configurés : surveillance avec des tests statistiques et surveillance par reconnaissance des formes.

### I.5.1.1 Surveillance avec outils statistiques

Cette méthode consiste à supposer que les signaux fournis par les capteurs possèdent certaines propriétés statistiques. On effectue alors quelques tests qui permettent de vérifier si ces propriétés sont présentes dans un échantillon des signaux mesurés de taille  $n$ . On

considère que le signal mesuré est une variable aléatoire. Beaucoup de tests statistiques peuvent être appliqué, on va présenter que trois tests qui sont :

Le traitement statistique du signal consiste à calculer les paramètres statistiques de certaines variables significatives du processus tels que les moments statistiques (moyenne, variance, ...), la somme cumulée, ... Chacune des valeurs statistiques est testée afin de détecter un défaut présent sur le signal.

### **I.5.1.1.1 Test de franchissement de seuils**

C'est le plus simple des tests, il consiste à comparer ponctuellement les signaux avec des seuils préétablis. Une alarme est générée dès qu'un des signaux capteurs dépasse ce seuil. Ce type de méthode est très simple à mettre en œuvre mais ne permet pas d'établir un diagnostic des défaillances. Cette méthode est aussi très sensible aux fausses alarmes.

### **I.5.1.1.2 Test de moyenne**

Le test de comparaison est effectué sur la moyenne du signal contenu dans une fenêtre de  $n$  valeurs :

$$\hat{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=t-n+1}^t y_i$$

### **I.5.1.1.3 Test de variance**

On peut également calculer la variance d'un signal. Tant que cette variance se situe dans une bande située autour de sa valeur nominale, l'évolution du système est supposée normale.

La variance de l'échantillon est définie par :

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=t-n+1}^t (y_i - \hat{y})^2$$

### **I.5.1.2 Surveillance par reconnaissance des formes**

Cette approche permet d'avoir une relation d'un espace caractéristique vers un espace de décision, en associant un ensemble de mesures effectuées sur le système à des états de fonctionnement connus, de façon à minimiser le risque de mauvaise classification

La surveillance par reconnaissance des formes peut être réalisée par l'une des deux techniques: la première est la reconnaissance des formes par la logique floue et la deuxième est la reconnaissance des formes par réseaux de neurones.

#### **I.5.1.2.1 Reconnaissance des formes par une approche floue**

En reconnaissance des formes par approche floue, les classes sont représentées par des sous-ensembles flous. Une fonction d'appartenance quantifie le degré d'appartenance  $\lambda_i(x)$  de chaque vecteur  $x$  à la classe  $\alpha_i$ . La mise en œuvre d'une méthode de classification floue implique deux étapes : la construction des fonctions d'appartenance et la définition des règles de décision.

#### **I.5.1.2.2 Reconnaissance des formes par réseaux de neurones**

Le diagnostic réalisé par réseaux de neurones doit disposer d'un nombre suffisant d'exemples de bon fonctionnement et de défauts pour pouvoir les apprendre. Pendant la phase d'apprentissage, les exemples sont présentés au réseau en entrée avec les diagnostics correspondants à la sortie. Le réseau s'auto-organise, apprenant à relier les exemples montrés aux diagnostics. Après l'apprentissage, le réseau ne reconnaît pas seulement les exemples appris mais également des paradigmes leur ressemblant, ce qui correspond à une certaine robustesse par rapport aux déformations de signaux par le bruit.

### **I.5.2 Méthodes de diagnostic avec modèle**

Les méthodes de surveillance avec modèle ont pour principe de comparer les mesures effectuées sur le système aux informations fournies par le modèle alors la défaillance c'est l'écart entre les deux.

On peut distinguer deux types d'approches suivant que l'on considère les mesures prises isolément les unes des autres ou qu'au contraire on présume des relations

mathématiques les reliant. La première approche est connue sous le nom d'analyse mono signal, la deuxième est dénommée analyse multi-signaux ou redondance analytique.

### **I.5.2.1 Les méthodes basées sur l'approche mono-signal**

#### **I.5.2.1.1 Redondances physiques**

Il s'agit de doubler ou tripler le nombre de capteurs. Si ces capteurs identiques placés dans le même environnement émettent des signaux identiques, on considère qu'ils sont dans un état de fonctionnement nominal et, dans le cas contraire, on considère qu'une défaillance capteur s'est produite dans au moins une des composantes.

La simplicité de sa conception est un avantage mais cette méthode reste coûteuse à être mise en œuvre et conduit à des installations encombrantes.

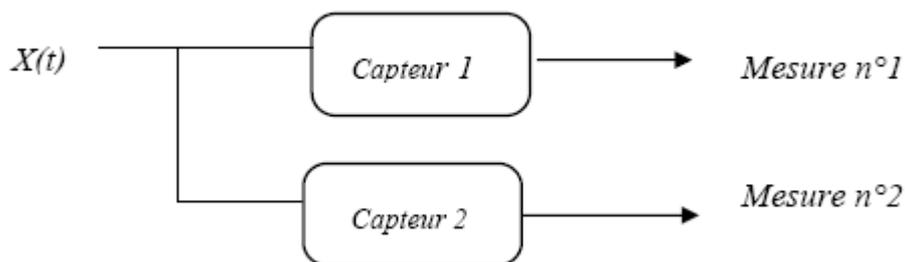


Fig.1.3.Schéma représentant la redondance physique.

#### **I.5.2.1.2 Analyse spectrale**

Les signaux sont analysés en état normal de fonctionnement ; les hautes fréquences sont reliées au bruit et les basses fréquences aux évolutions propres de l'état du procédé. Ensuite, toute déviation des caractéristiques fréquentielles d'un signal est reliée à une situation de défaillance.

### **I.5.2.2 L'approche multi-signaux ou redondances analytiques**

Elles consistent à exploiter les contraintes liant les différentes variables du système. Ces contraintes peuvent souvent s'exprimer sous la forme de relations analytiques, appelées relations de redondances analytiques, liant les variables connues (relations d'entrée/sortie ou

de sortie/sortie). Le but des méthodes de redondance analytique est d'estimer l'état du système afin de le comparer à son état réel.

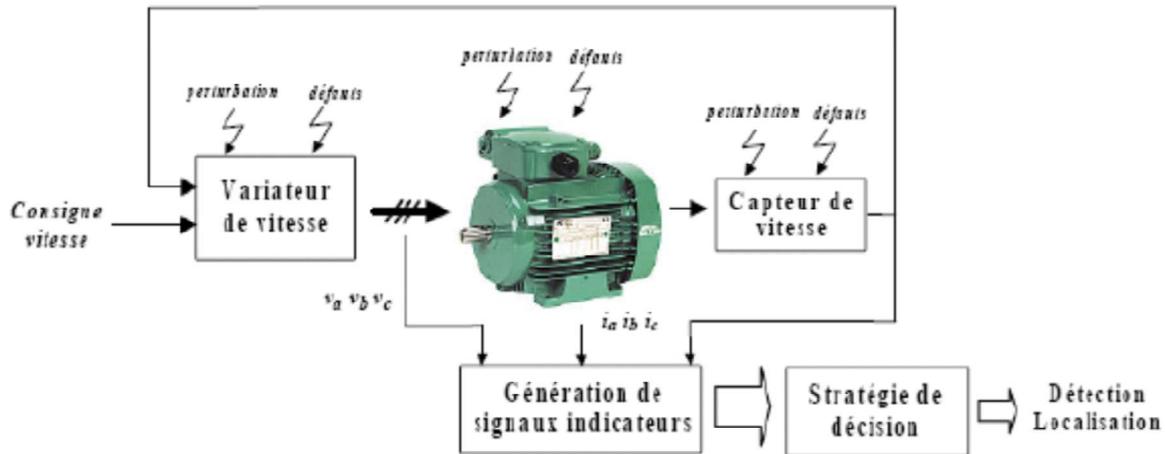


Fig.1.4. Principe général du diagnostic à base de modèles analytiques

### I.5.2.3 Espace de parité

Les équations du modèle sont projetées dans un espace particulier appelé espace de parité, permettant ainsi d'éliminer les inconnues à l'aide de redondances. Les équations projetées ne font intervenir que des variables mesurables (les entrées et les sorties du système) sur une fenêtre d'estimation. L'idée est de tester la cohérence des mesures par rapport à leurs estimées données par le modèle.

### I.5.2.4 Observateurs

Les méthodes à base d'observateurs ont pour principe de reconstruire les états et les sorties du système à partir des entrées et des sorties.

La théorie des observateurs est utilisée pour des systèmes linéaires ou non linéaires, d'ordre plein s'ils estiment l'intégralité du vecteur d'état (le système doit être complètement observable) ou d'ordre réduit dans le cas contraire, dans le domaine fréquentiel (observateurs généralisés) ou temporel (observateurs de Luenberger). Aussi il y a une classe d'observateurs dits observateurs à entrées inconnues dont les sorties du système sont indépendantes des incertitudes structurées auxquelles il est soumis.

### **I.5.2.5 Estimation paramétrique**

L'approche d'estimation paramétrique considère que l'influence de défauts se reflète sur les paramètres et non pas uniquement sur les variables du système physique. Le principe de cette méthode consiste à estimer en continu des paramètres du procédé en utilisant les mesures d'entrée/sortie et en évaluant la distance qui les sépare des valeurs de référence de l'état normal du procédé.

L'estimation paramétrique possède l'avantage d'apporter de l'information sur l'importance des déviations. Toutefois, un des inconvénients majeurs de la méthode réside dans la nécessité d'avoir un système physique excité en permanence. Ceci pose donc des problèmes d'ordre pratique dans le cas de procédés dangereux, coûteux ou fonctionnant en mode stationnaire. De plus, les relations entre paramètres mathématiques et physiques ne sont pas toujours inversibles de façon unitaire, ce qui complique la tâche du diagnostic basé sur les résidus. [3]

## **Conclusion**

Ce chapitre a eu pour objectif d'introduire les différents concepts relatifs au diagnostic des défauts et de présenter les différentes méthodes proposées dans ce domaine. Bien qu'il existe dans la littérature plusieurs classifications, nous avons distingué, essentiellement, entre les méthodes analytiques (estimation d'état, estimation paramétrique, équation de parité) qui sont basées sur l'existence de modèles mathématiques et les méthodes symboliques basées sur les approches de l'intelligence artificielle, de la logique floue, des réseaux de neurones...etc. Ces dernières sont utilisées dans le cas où la modélisation mathématique du système serait complexe ou inexistante.

*Chapitre II*

**DEFAUTS DE LA MACHINE  
ASYNCHRONE**

## **Chapitre II : *Défauts de la machine asynchrone***

---

### **Introduction**

D'une technologie simple, la machine asynchrone, ou moteur à induction, est largement utilisée dans la plupart des entraînements électriques, notamment pour des applications à vitesse constante comme la ventilation et le pompage. Tous les progrès de l'électronique de puissance associés aux commandes modernes autopilotées ont permis d'envisager des applications en vitesse variable de manière efficace, ce qui était auparavant réservé exclusivement au moteur à courant continu et plus récemment au moteur synchrone.

Donc, c'est par sa robustesse, coût faible, fiabilité, facilité à entretenir et par sa souplesse, qu'il y a un intérêt croissant pour l'utilisation de la machine asynchrone dans les entraînements électriques. Son domaine d'application est déjà très vaste; nous la trouvons dans la traction ferroviaire, la propulsion électrique des navires, le pompage, la ventilation, les machines outils, les laminoirs, les machines à papier et la voiture électrique entre autres. [2]

Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique ce qui fait l'objet de ce chapitre de présenter les éléments de constitution de la machine et les différents défauts qui peuvent apparaître sur eux.

### **I.1 La constitution de la machine asynchrone**

L'organisation d'une machine asynchrone est constituée des principaux éléments suivants :

- le stator (partie fixe) constitué de disques en tôle magnétique portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- le rotor (partie tournante) constitué de disques en tôle magnétique empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement bobiné ou injecté.
- les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles

#### **I.1.1 Le stator**

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (figure 2.1). [22]



Fig.2.1.Le stator de la machine asynchrone

## **II.1.2 Le rotor**

Il existe deux types de rotor : bobiné et à cage d'écureuil.

### **II.1.2.1 Le rotor bobiné**

Le rotor comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôle empilés sur l'arbre de la machine. Les extrémités des enroulements rotoriques sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre, sur lesquelles frottent des balais en carbone.

Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles et/ou nombreux. [31]



Fig.2.2.Le rotor bobiné

### II.1.2.2 Le rotor à cage d'écureuil

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. (Fig.2.3)

Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettés dans les tôles du rotor. (Fig.2.4)

Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.

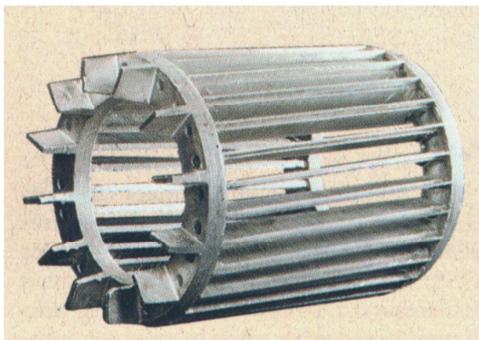


Fig.2.3. La cage d'écureuil



Fig.2.4. Le rotor à cage

### II.1.3 Les organes mécaniques

La carcasse joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est supporté par un ou plusieurs paliers. [22].

Ces paliers qui permettent de supporter et mettre en rotation l'arbre rotorique sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques

moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou de tiges de serrage. [9]

## **II.2 Les défaillances de la machine asynchrone**

Bien que la machine asynchrone à cage d'écurueil soit réputée robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts. Ces défauts peuvent être soit d'origine électrique, soit d'origine mécanique. Un problème minime à l'étape de fabrication peut être à l'origine d'un défaut tout comme une utilisation non conforme de la machine. Certaines fois, nous pouvons aussi incriminer le milieu dans lequel la machine est utilisée (milieux corrosifs et/ou chimique hostiles).

### **II.2.1 Les causes des défauts**

Les causes des défauts sont multiples. Elles peuvent être classées en trois groupes:

- Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), problèmes mécaniques, rupture de fixations, problème d'isolation, survolage d'alimentation...
- Les amplificateurs de défauts : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, alimentation perturbée (instabilité de la tension ou de la fréquence), échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement...
- Les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, défektivité des composants, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine... [3]

### **II.2.2 Les défauts d'ordre électrique**

Ces défaillances se séparent en deux catégories bien distinctes. Nous pouvons citer les défauts qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celle qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques.

#### **II.2.2.1 Les Défauts statoriques**

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit :

### **II.2.2.1.1 Les court-circuit internes**

Ce sont des pannes dues à un court-circuit dans une ou plusieurs phases statoriques. Ce type de défaut provoque une détérioration de la machine. Il conduit à un déséquilibre de phases, ce qui perturbe les commandes développées sur la base du modèle de Park considéré comme un modèle équilibré.

Un défaut de court-circuit est une connexion directe entre deux points du bobinage.

- Les court-circuit apparaissent, en général, dans les enroulements de phases différentes et dans les têtes de bobines, parce que c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient.
- Les court-circuit entre spires de la même phase apparaissent soit au niveau des têtes des bobines soit dans les encoches. Ce sont des défauts très fréquents. Ils peuvent se manifester soit entre des spires au milieu du bobinage ou bien entre une spire et le neutre.
- Les court-circuit proches de l'alimentation entre phases, induisent des courants très forts qui conduisent à une fusion des conducteurs d'alimentation et à la disjonction par les protections.

### **II.2.2.1.2. Les isolations électriques :**

Les défauts d'isolation électrique au niveau du bobinage du stator suite à un vieillissement du au milieu de fonctionnement hostile ou non, et à la façon dont est alimenté le moteur. [15]

### **II.2.2.1.3. Les décharges partielles :**

Ce type de défaut est dû aux décharges dans les isolants entre conducteurs ou entre conducteurs et la masse qui s'amplifie avec l'usure des isolants. Sa présence précède l'apparition de court-circuit entre phases ou entre phases et masse. [3]

### **II.2.2.1.4. Défauts de circuit magnétique**

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc. [22]

### **II.2.2.2 Les défauts rotoriques**

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit :

- Rupture de barres
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.

Une défaillance au niveau de la cage d'écureuil se situe généralement à la jointure entre une barre et un anneau de court-circuit car ils ne sont pas construits d'un seul bloc (sauf pour les machines à petites puissances).

#### **II.2.2.2.1 Rupture de barres**

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées. [22]

La détection de ces défaillances est rendue difficile par le fait que lors de leur apparition la machine continue à fonctionner. Le courant que conduisait une barre cassée par, exemple, se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres sont alors surchargées, ce qui conduit à leurs ruptures, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisant pour provoquer l'arrêt de la machine. [3]

#### **II.2.2.2.2 Rupture d'anneaux**

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Cette rupture déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres. [22]

## II.2.3 Les défauts d'ordre mécaniques

### II.2.3.1 Excentricité statique et dynamique

Elles sont principalement dues à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, l'usure des paliers ou la torsion de l'arbre

-Excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe. (Fig.2.5)

-Excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe. (Fig.2.5)

-Excentricité globale associe les deux cas précédents. [5]

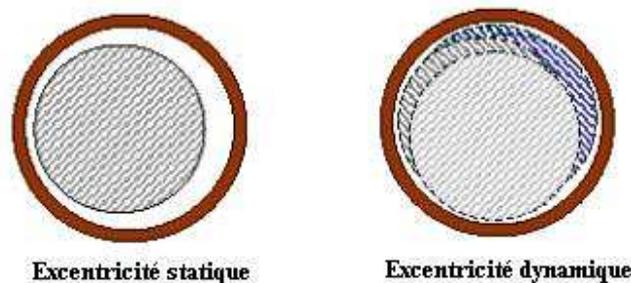


Fig.2.5.Excentricité statique et dynamique

### II.2.3.2 Roulements à billes et flasques

Ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est généralement lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement.

Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur. [22]

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication.

Un mauvais positionnement de flasques provoque un désalignement de roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre. [9]

### **II.2.3.3 La dissymétrie du rotor**

Ce sont des défauts d'alignement. Ils sont dus à une irrégularité de l'entrefer qui induit des frottements et par conséquent, une dissymétrie qui va générer des défauts mécaniques (vibrations). Ce type de défauts provoque une répartition non homogène des courants dans le rotor ainsi qu'un déséquilibre des courants statoriques. [15]

### **II.2.4 Défauts divers**

Autres défauts peuvent se produire et provoquent une dérive des performances de la machine. Nous pouvons citer les cas suivants :

- Défauts de fixation.
- Engrenage endommagé.
- Excitation hydrodynamique.
- Défauts induits par un desserrage.

Chaque défaut se traduit par son image fréquentiel à travers le courant absorbé par la machine. [2]

## **Conclusion**

L'objectif de ce chapitre était de présenter d'une manière générale la constitution de la machine asynchrone en citant en premier lieu les différentes parties qui la compose : les deux bobinages statorique et rotorique. Ensuite, nous avons présenté les principaux défauts qui peuvent gêner le fonctionnement normal de la machine ainsi que les causes probables, nous avons distingué deux types de défauts : les défauts d'ordre électriques et les défauts d'ordre mécanique. Et par la fin nous avons mentionné quelques défauts d'origine diverse.

*Chapitre III*

**MODELISATION ET  
DISCRIMINATION DES DEFAUTS**

## Chapitre III : Modélisation et Discrimination des défauts

### Introduction

Le diagnostic des défauts de la machine asynchrone par les méthodes à base de modèle, et plus particulièrement les méthodes à base d'observateurs, nécessite une modélisation adéquate de celle-ci où il sera mis en évidence les défauts que l'on désire détecter et éventuellement les entrées inconnues ce qui fait l'objet de chapitre.

### III.1. Hypothèses simplificatrices

Le moteur est constitué de deux parties; le circuit électrique et le circuit magnétique. Le circuit électrique est constitué de trois bobinages répartis au stator, alimentés en triphasé alternatif en courant ou en tension. Le rotor du moteur est constitué de barres court-circuitées et disposées en cage d'écureuil ou d'un bobinage rotorique (dans le cas d'une machine à rotor bobiné). Il est représenté dans le modèle triphasé-triphasé par trois phases court-circuitées entre elles et ramenées au stator.

Des hypothèses simplificatrices sont posées lors de l'élaboration d'un tel modèle:

- Les pertes fer sont négligées.
- La saturation du circuit magnétique est négligée.
- L'effet d'extrémité des têtes de bobines est négligé.
- Le stator est considéré comme lisse et l'entrefer constant (l'effet des encoches est négligé).

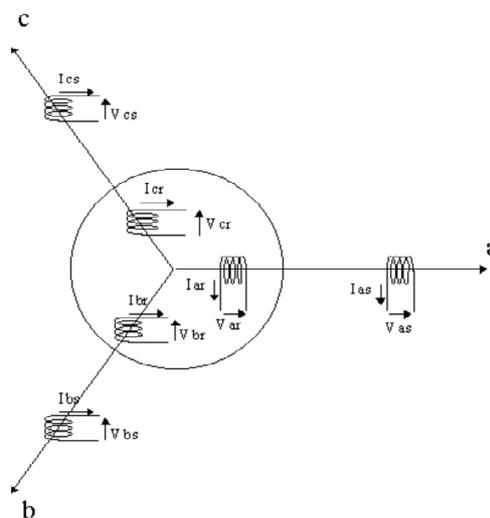


Fig.3.1.Présentation du modèle triphasé

### III.2 Les équations électriques

Le modèle triphasé-triphasé représente réellement les trois phases statoriques ce qui permet de différencier le comportement de chaque phase. Les enroulements rotoriques (barres + anneaux) sont représentés par trois phases rapportées au stator.

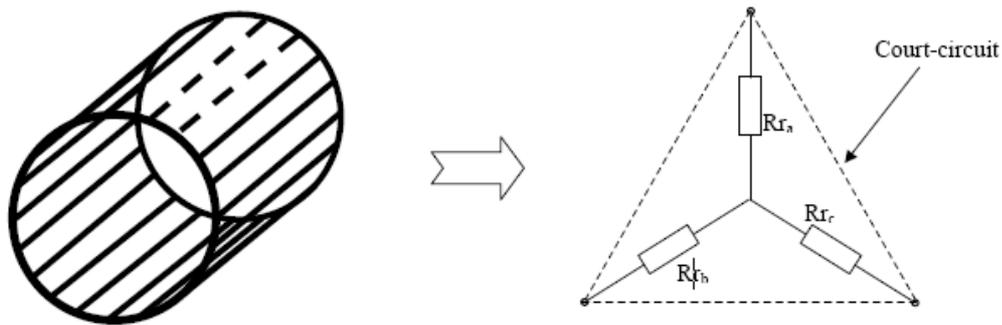


Fig.3.2.Représentation du rotor

Les équations électriques statoriques et rotoriques sont les suivantes :

$$\begin{aligned} v_{sa} &= R_{sa}i_{sa} + \frac{d\varphi_{sa}}{dt} \\ v_{sb} &= R_{sb}i_{sb} + \frac{d\varphi_{sb}}{dt} \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} v_{ra} &= R_{ra}i_{ra} + \frac{d\varphi_{ra}}{dt} = 0 \\ v_{rb} &= R_{rb}i_{rb} + \frac{d\varphi_{rb}}{dt} = 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} v_{sc} &= R_{sc}i_{sc} + \frac{d\varphi_{sc}}{dt} \\ v_{rc} &= R_{rc}i_{rc} + \frac{d\varphi_{rc}}{dt} = 0 \end{aligned}$$

### III.3 Les équations mécaniques

Le comportement mécanique de la machine asynchrone dépend de l'inertie  $J$ , du couple électromagnétique  $C_e$ , du couple mécanique résistant  $C_r$ , et du couple de frottement fluide  $C_f = f \omega$  où  $f$  est la constante de frottement fluide. Le frottement sec, lui, est indépendant de la vitesse, et n'est pas pris en compte.

L'équation mécanique est définie par: 
$$J \frac{d\omega}{dt} = C_e - C_r - C_f \quad (3.3)$$

Le couple électromagnétique en fonction des courants statoriques et des trois courants rotoriques s'exprime sous la forme 
$$C_e = [I]^t \cdot [G] \cdot [I] \quad (3.4)$$

### III.4 Le modèle triphasé-triphasé

Sachant que :  $\varphi = L \cdot I$ , les deux systèmes d'équations peuvent s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$[V] = [R][I] + \frac{d[L]I}{dt}, \text{ ce qui nous ramène à : } [V] = [R][I] + \frac{d[L]}{dt}[I] + [L] \frac{d[I]}{dt} \quad (3.5)$$

$$\text{En décomposant : } \frac{d[L]}{dt} = \frac{d[L]}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = [G] \cdot \omega_r \quad (3.6)$$

$$\text{Alors : } [V] = ([R] + [G] \cdot \omega_r)[I] + [L] \frac{d[I]}{dt} \quad (3.7)$$

$$\text{Avec } [V]^t = [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs} \ 0 \ 0 \ 0] \text{ et } [I]^t = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs} \ i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{sa} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{sb} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{ra} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{rb} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{sa} + L_{fsa} & M'_{sasb} & M''_{sbsc} & M_{sara} & M'_{sarb} & M''_{sarc} \\ M''_{sbbsa} & L_{sb} + L_{fsb} & M'_{sbbsc} & M''_{sbra} & M_{sbrb} & M'_{sbrc} \\ M'_{scsa} & M''_{scsb} & L_{sc} + L_{fsc} & M'_{scra} & M''_{scrib} & M_{scrc} \\ M_{rasa} & M'_{rasb} & M''_{rasc} & L_{ra} + L_{fra} & M'_{rarb} & M''_{rarc} \\ M''_{rbbsa} & M_{rbbsb} & M'_{rbbsc} & M''_{rbra} & L_{rb} + L_{frb} & M'_{rbrc} \\ M'_{rcsa} & M''_{rcsb} & M_{rcsc} & M'_{rcra} & M''_{rcrb} & L_{rc} + L_{frc} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Dans le cas d'une machine saine sans déséquilibre des paramètres nous avons :

$R_s = R_{sa} = R_{sb} = R_{sc}$  et  $R_r = R_{ra} = R_{rb} = R_{rc}$ , et la matrice inductive [L] deviendra :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_s + L_{fs} & -\frac{L_s}{2} & -\frac{L_s}{2} & L_m \cos(p\theta) & L_m \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) & L_m \cos(p\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ -\frac{L_s}{2} & L_s + L_{fs} & -\frac{L_s}{2} & L_m \cos(p\theta + \frac{4\pi}{3}) & L_m \cos(p\theta) & L_m \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\frac{L_s}{2} & -\frac{L_s}{2} & L_s + L_{fs} & L_m \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) & L_m \cos(p\theta + \frac{4\pi}{3}) & L_m \cos(p\theta) \\ L_m \cos(p\theta) & L_m \cos(p\theta + \frac{4\pi}{3}) & L_m \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) & L_r + L_{fr} & -\frac{L_r}{2} & -\frac{L_r}{2} \\ L_m \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) & L_m \cos(p\theta) & L_m \cos(p\theta + \frac{4\pi}{3}) & -\frac{L_r}{2} & L_r + L_{fr} & -\frac{L_r}{2} \\ L_m \cos(p\theta + \frac{4\pi}{3}) & L_m \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) & L_m \cos(p\theta) & M'_{rbra} & -\frac{L_r}{2} & L_r + L_{fr} \end{bmatrix}$$

$$(3.10)$$

$$[G] = -pL_m \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \sin(p\theta) & \sin(p\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(p\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ 0 & 0 & 0 & \sin(p\theta + \frac{4\pi}{3}) & \sin(p\theta) & \sin(p\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & 0 & 0 & \sin(p\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(p\theta + \frac{4\pi}{3}) & \sin(p\theta) \\ \sin(p\theta) & \sin(p\theta + \frac{4\pi}{3}) & \sin(p\theta + \frac{2\pi}{3}) & 0 & 0 & 0 \\ \sin(p\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(p\theta) & \sin(p\theta + \frac{4\pi}{3}) & 0 & 0 & 0 \\ L_m \cos(p\theta + \frac{4\pi}{3}) & \sin(p\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(p\theta) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Le modèle triphasé-triphasé de la machine asynchrone est [3][9][8]:

$$\begin{aligned} \dot{I} &= [L]^{-1}([V] - ([R] + [G]\omega)[I]) \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{2J} ([I]^t [G] [I]) - \frac{C_r}{J} - \frac{f}{J} \omega \\ \dot{\theta} &= \omega \end{aligned} \quad (3.12)$$

L'utilisation des transformations sur le modèle de la machine pour le simplifier (Park, Concordia, Clark ...) masque quelques informations utiles pour le diagnostic. Donc le modèle triphasé s'avère le plus adéquat pour le diagnostic car il représente réellement la machine asynchrone ainsi le développement des outils de calcul ont permis d'exploiter ce modèle en temps réel.

### III.5 Modélisation en vue du diagnostic

Afin de réduire la taille du vecteur d'état et par conséquent la complexité de la modélisation, nous appliquerons l'hypothèse de découplage du mode mécanique vis-à-vis les modes électriques et magnétiques. Cela vient à considérer l'invariance de la vitesse rotorique entre deux instants d'échantillonnage. Cette hypothèse nécessite que les modes électriques soient rapides devant le mode mécanique sachant que la période d'échantillonnage est de durée faible devant la constante du temps mécanique. Donc pour le vecteur d'état sera réduit et on obtient le modèle suivant qui sera utilisé par la suite pour la synthèse des observateurs :

$$\dot{I} = [L]^{-1}([V] - ([R] + [G]\omega)[I]) \quad (3.13)$$

Dans la synthèse des observateurs, la vitesse sera injectée dans le modèle observé de la machine (par conséquent la position angulaire) pour assurer la robustesse contre les

perturbations mécaniques et compenser l'effet de l'élimination de la vitesse dans l'observation (augmenter la rapidité de l'observateur).

### III.6 Simulation

La simulation du modèle élaboré précédemment a été faite par la méthode explicite de Runge-Kutta d'ordre 4 sous MATLAB® [25]:

$$K_1 = F(X(t), t)$$

$$K_2 = F\left(X(t) + K_1 \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}\right)$$

$$K_3 = F\left(X(t) + K_2 \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}\right) \tag{3.14}$$

$$K_4 = F(X(t) + K_2 \Delta t, t + \Delta t)$$

$$X(t + \Delta t) = X(t) + \frac{K_1 + 2(K_2 + K_3) + K_4}{6}$$

Les résultats de la simulation sont montrés sur les figures suivantes :

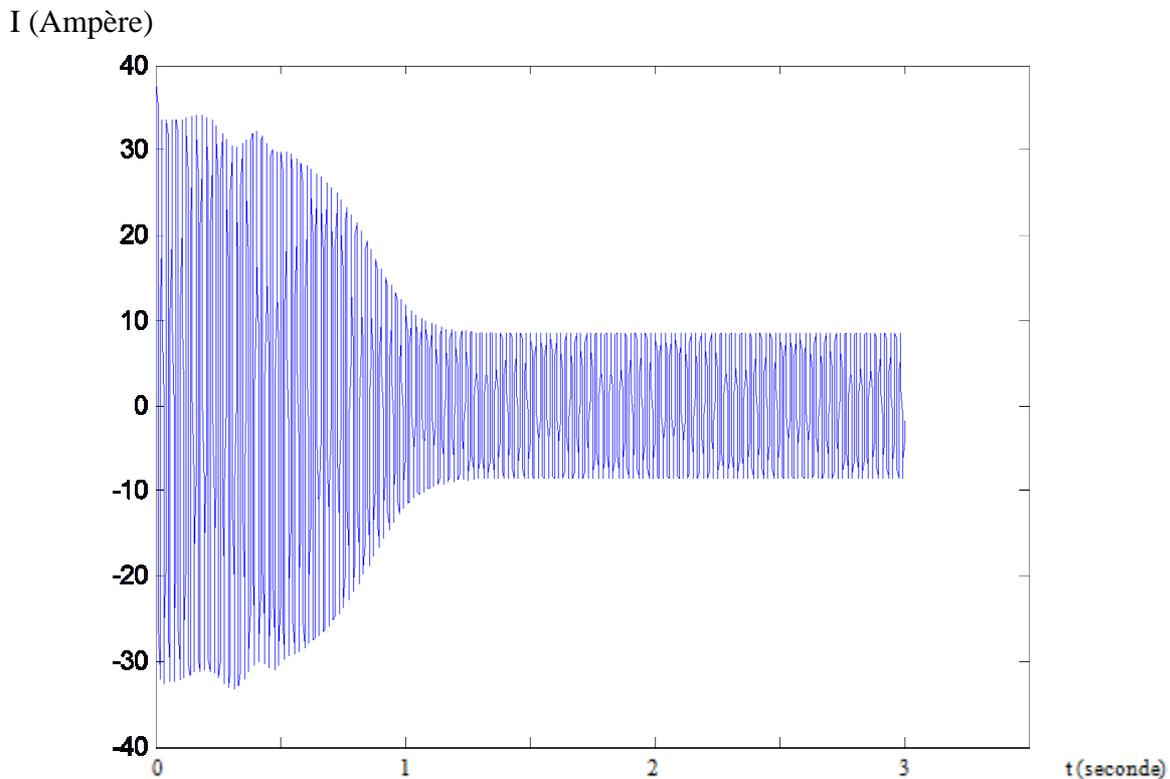


Fig.3.3.Courant statorique d'une phase

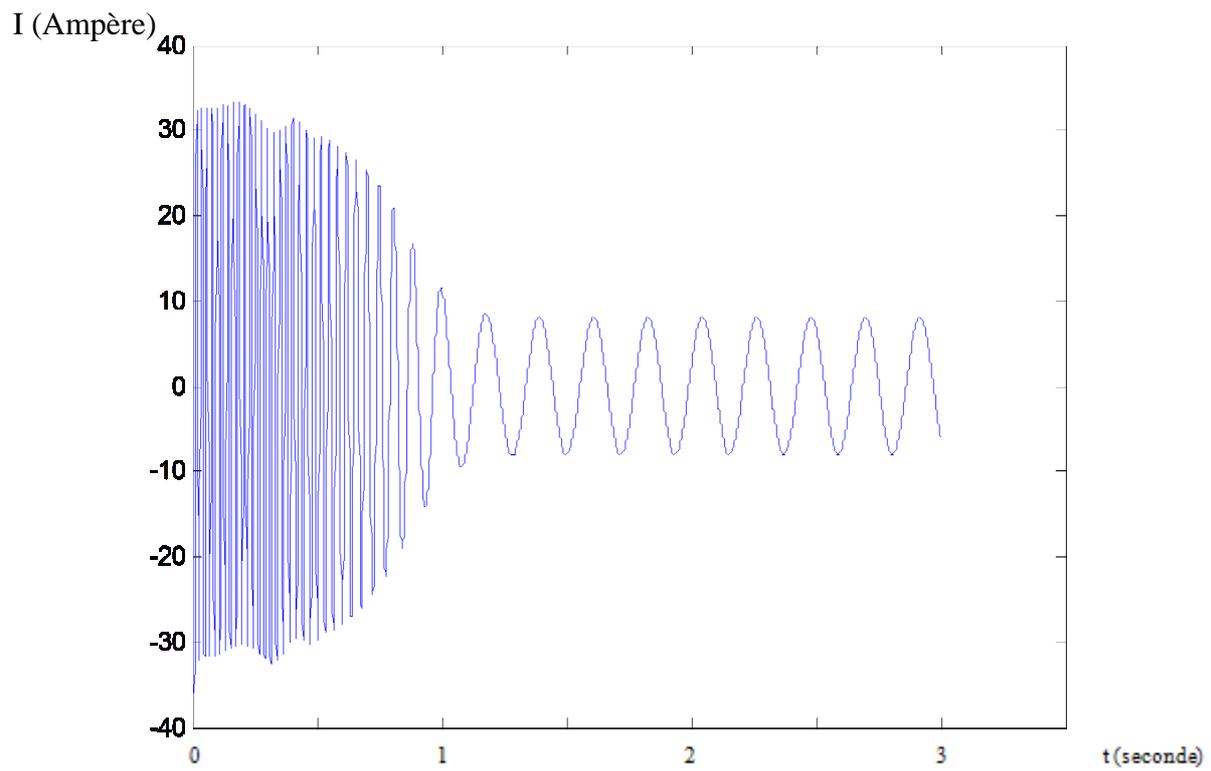


Fig.3.4.Courant rotorique

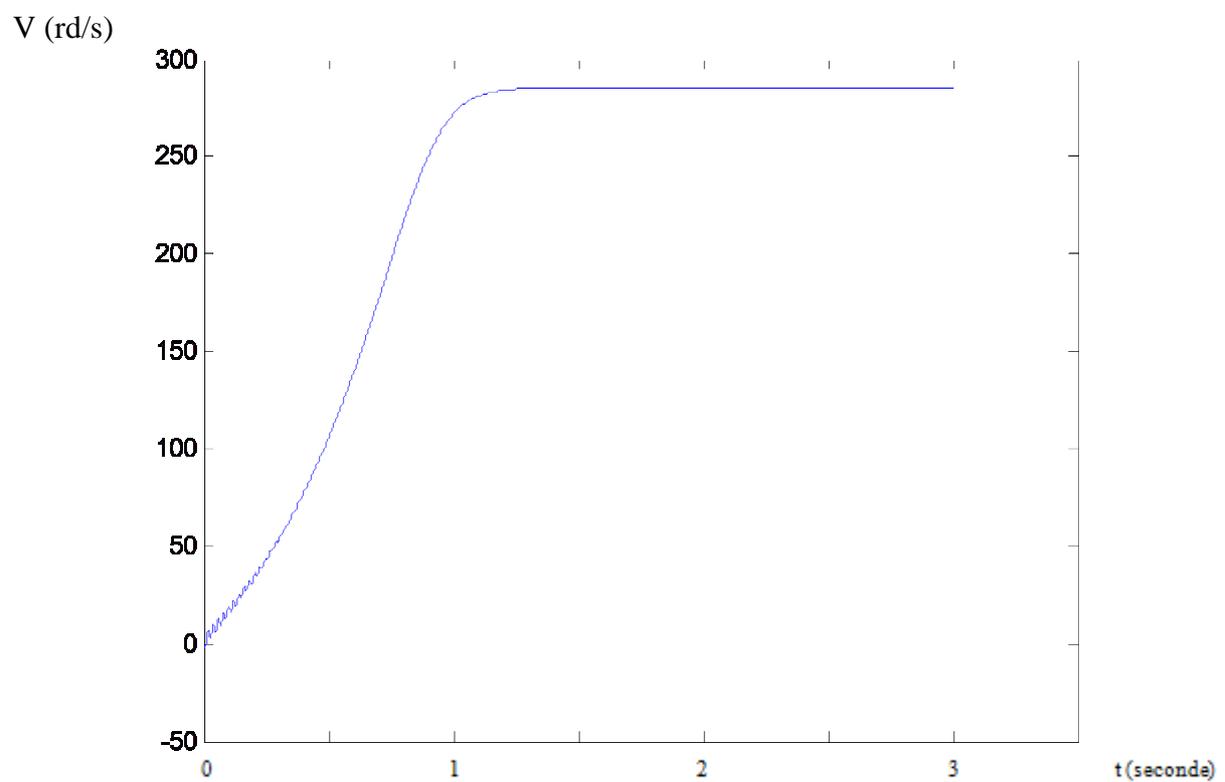


Fig.3.5.Vitesse angulaire

### III.7 Discrimination des défauts

#### III.7.1 Défaut statorique

Un défaut dans une phase du stator se traduit par l'augmentation et le déséquilibre des trois courants statoriques plus la dégradation de la vitesse et pour simuler ce défaut nous faisons varier les paramètres de la machine de la manière suivante :

Phase	Rs1	Rs2	Rs3	Ls1	Ls2	Ls3	Lr1	Lr2	Lr3
1	→	↗	↗	→	↗	↗	↗	↗	↗
2	↗	→	→	↗	→	→	→	→	→
3	↗	↗	↘	↗	↗	↘	↗	↗	↗

Tab.3 Simulation d'un défaut statorique

Ce tableau a été établi expérimentalement à partir de plusieurs expériences effectuées sur différents types de machine asynchrone. [3] [22] [28]

Les figures suivantes illustrent les différents courants et la vitesse lors d'un défaut sur la phase 1 à l'instant  $t=2s$ :

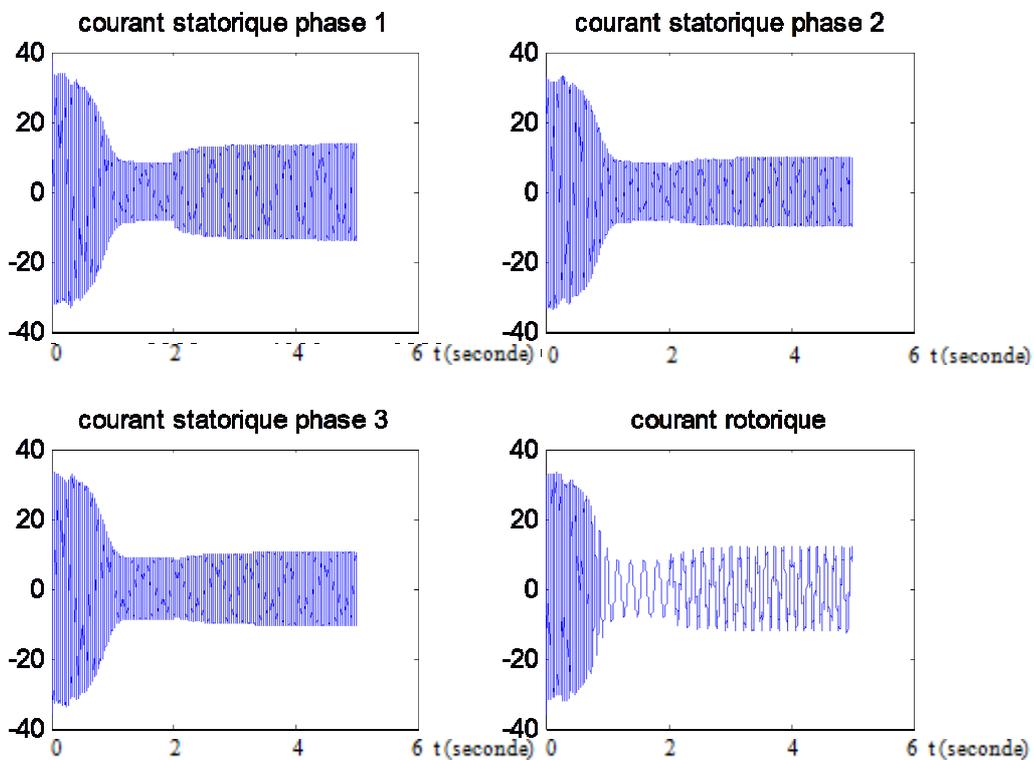


Fig.3.6 Les courant dans le cas d'un défaut sur la phase 1

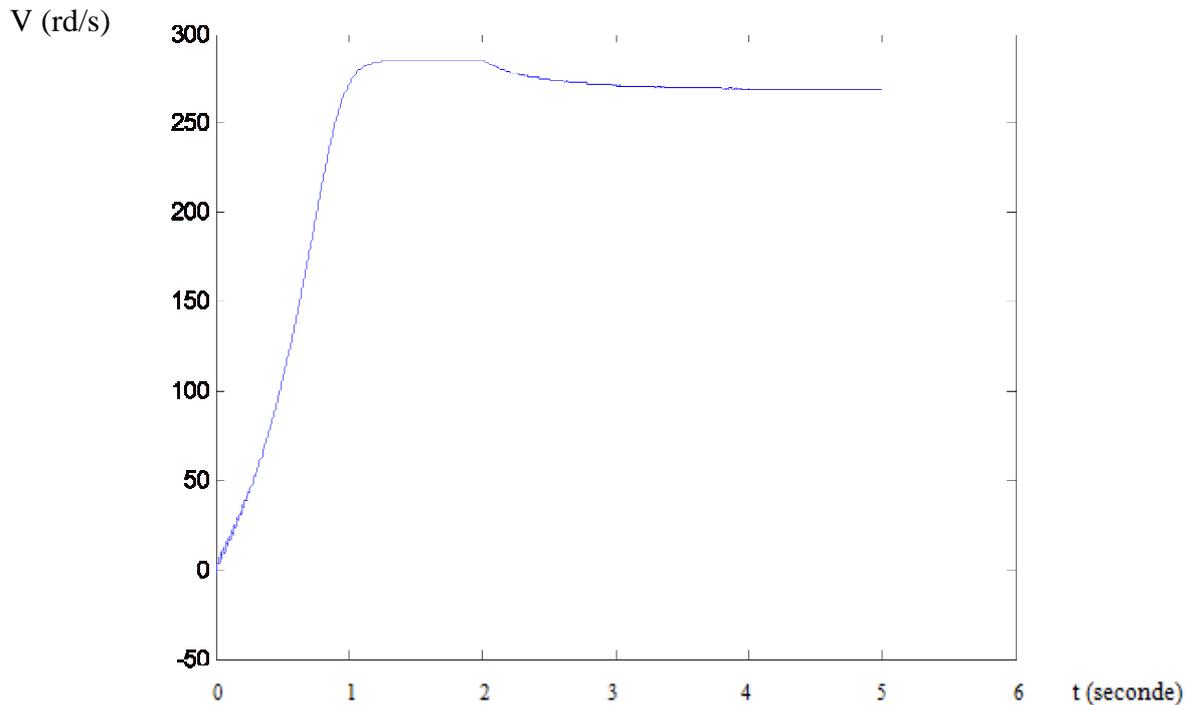


Fig.3.7 La vitesse dans le cas d'un défaut statorique

On remarque à travers les figures le déséquilibre et l'augmentation des courants statoriques et rotoriques et la dégradation de la vitesse. Pour éviter la redondance, on s'est limité à un défaut sur la phase 1 car on a les mêmes symptômes pour les autres phases.

### III.7.2 Défaut rotorique

Pour un défaut rotorique, il suffit de déséquilibrer les résistances rotoriques et augmenter l'inductance rotorique. [3] [22]

Les symptômes de ce défaut sont l'apparition des ondulations sur les courants statoriques, le déséquilibre des courants rotoriques et l'oscillation et la dégradation de la vitesse (réduction de la valeur moyenne du Couple électromagnétique).

Les figures suivantes montrent ces symptômes :

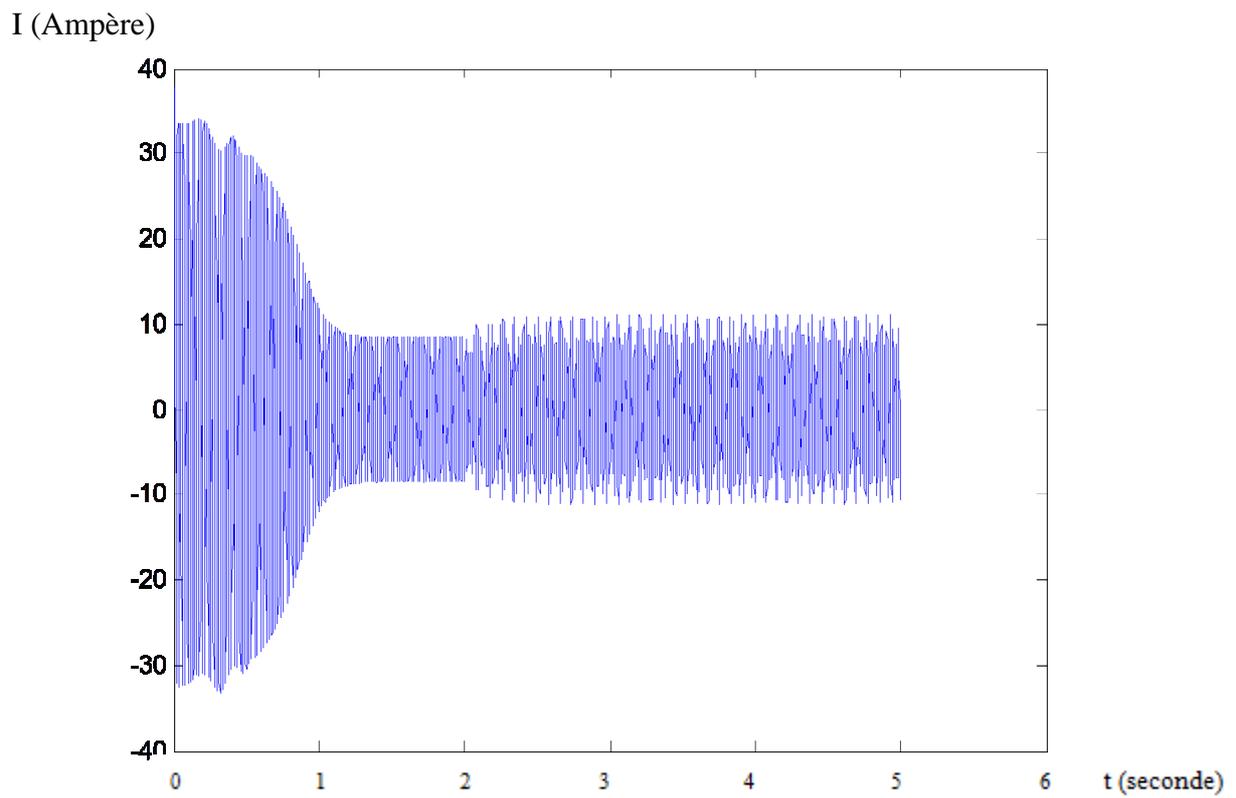


Fig.3.8 Le courant statorique dans le cas d'un défaut rotorique

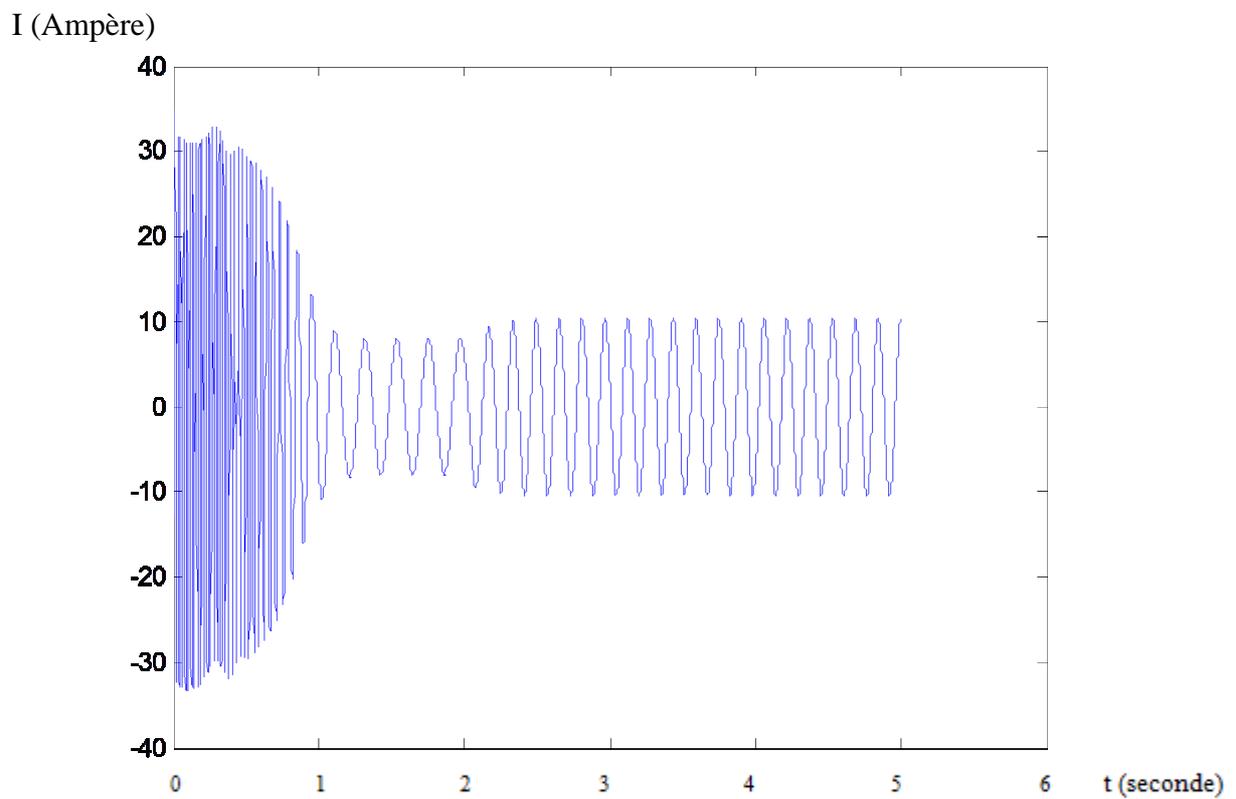


Fig.3.9 Le courant rotorique dans le cas d'un défaut rotorique

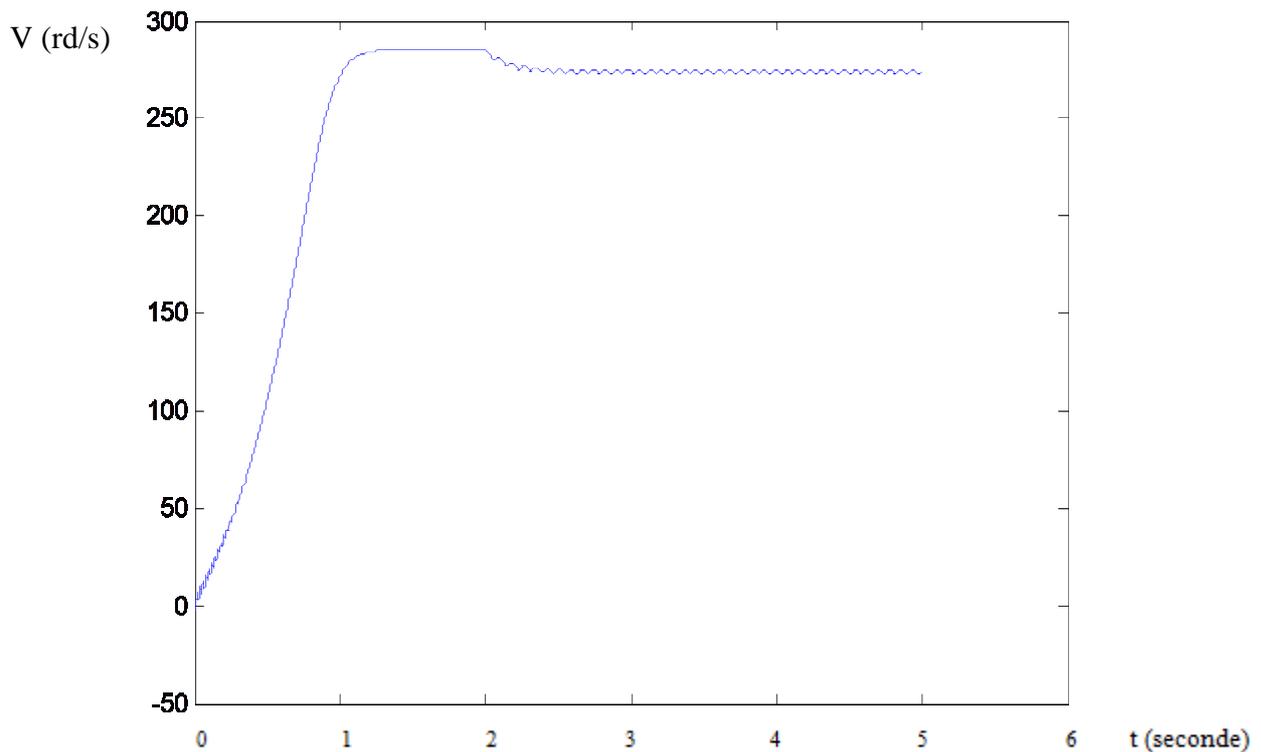


Fig.3.10 La vitesse dans le cas d'un défaut rotorique

### III.8 Validation par analyse spectrale

Grace à l'analyse spectrale du courant statorique, nous pourrions vérifier si les défauts simulés précédemment représentent les vrais défauts de la machine asynchrone à travers les raies qu'on peut observer autour du fondamental en cas de défaut.

Ces raies doivent correspondre aux fréquences théoriques calculées par les relations mathématiques suivantes [25] [8] [22] [20]:

- Défaut statorique  $f_d = \left(\frac{n}{p}(1 - g) \mp k\right) \cdot f_s$  (3.15)

- Défaut rotorique  $f_d = (1 \mp 2 \cdot k \cdot g) \cdot f_s$  (3.16)

$$n = 1,2,3 \dots$$

$$k = 1,3,5 \dots$$

En utilisant la transformé de Fourier rapide FFT (Fast Fourier Transform) avec une fenêtre rectangulaire et tenant compte de la résolution fréquentielle, les deux figures suivantes représentent le spectre du courant statorique dans le cas d'un moteur sain :

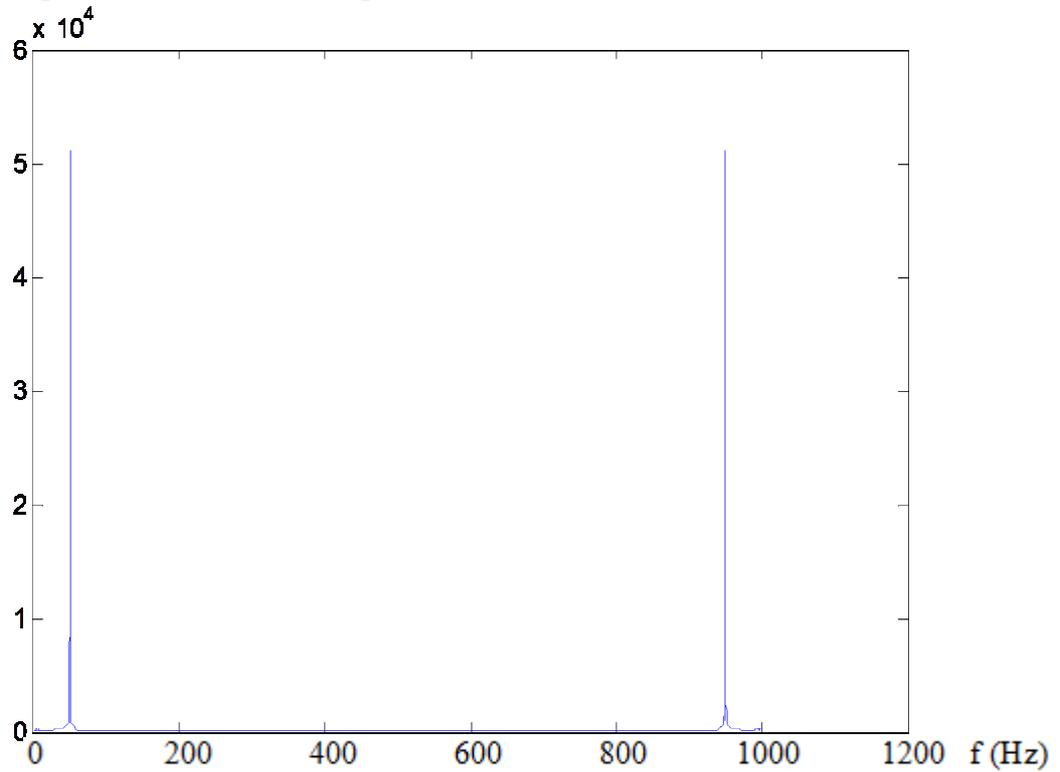


Fig.3.11 Spectre du courant statorique : moteur sain

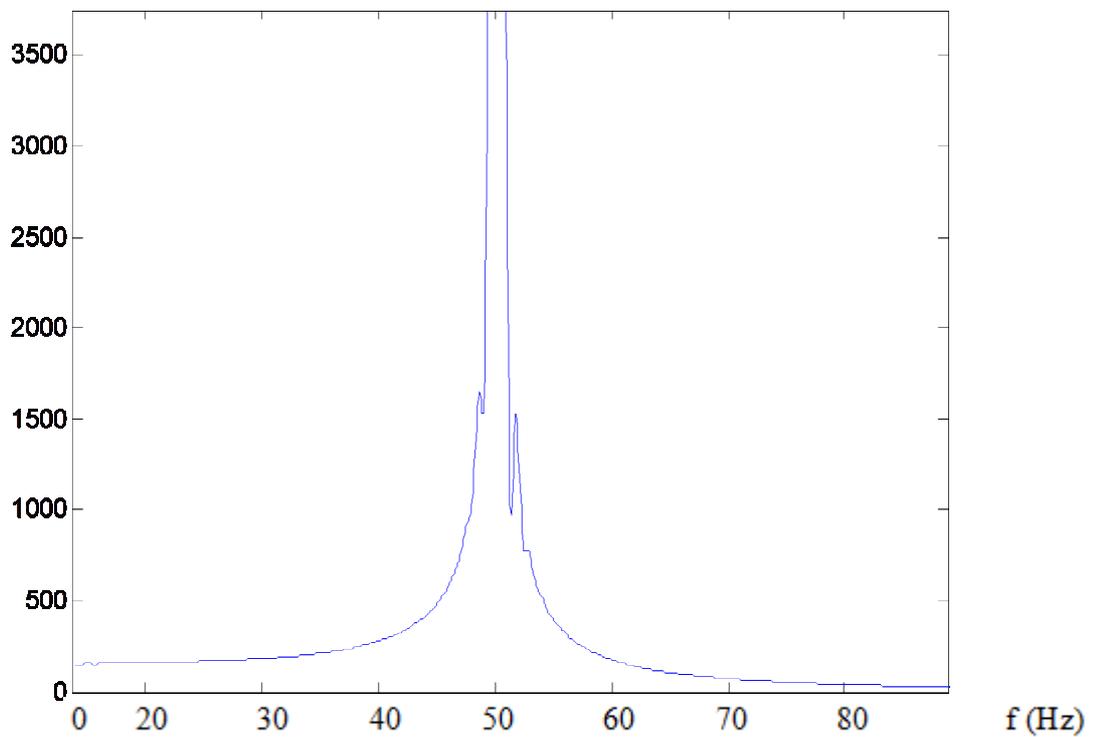


Fig.3.12 Spectre du courant statorique : moteur sain (agrandissement)

### III.8.1 Défaut rotorique

La figure suivante représente le spectre du courant statorique dans le cas d'un défaut rotorique :

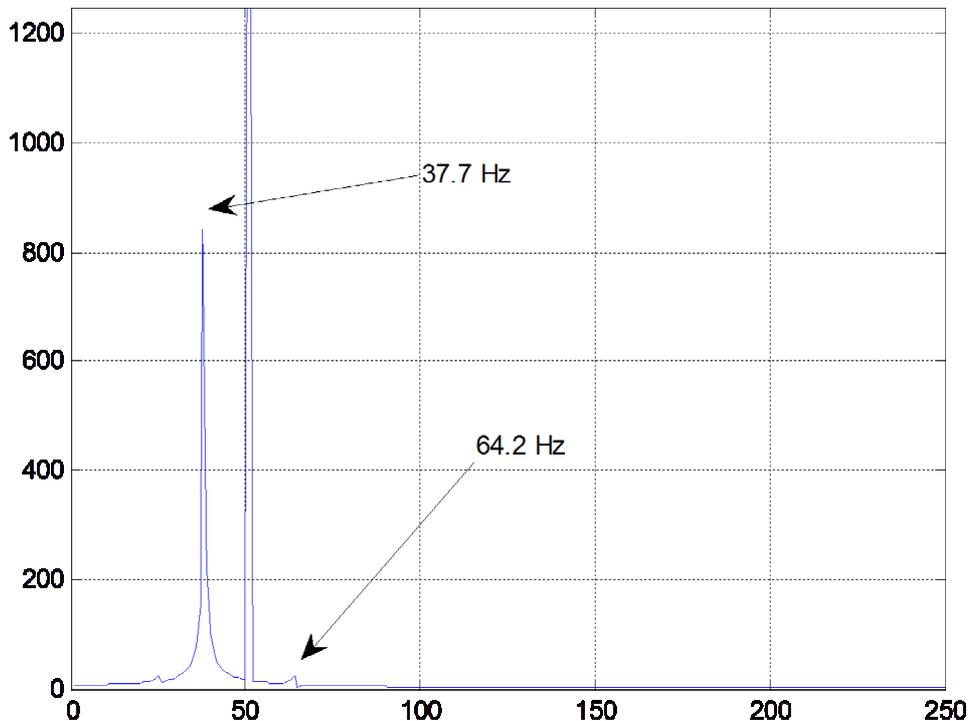


Fig.3.13 Spectre du courant statorique : défaut rotorique

On remarque l'apparition de deux raies à la fréquence 37.7 Hz et 64.2 Hz. Ces deux fréquences correspondent aux fréquences calculées par la relation (3.15) : 37.5 et 62.5 avec  $g=0.125$ .

L'erreur entre les fréquences réelles et théoriques revient au problème de résolution fréquentielle ( la résolution fréquentielle est inversement proportionnelle à la période d'acquisition ; 1 s dans ce cas), précision du tracé ( $\Delta f = \frac{f_s}{N}$ ) et le choix de la fenêtre de pondération (rectangulaire).

### III.8.2 Défaut statorique

Pour le défaut statorique, les raies n'apparaissent pas bien à l'aide d'une FFT donc nous avons utilisé une période d'acquisition plus longue que la précédente ( 10 s ).

La figure suivante montre le spectre du courant statorique dans le cas d'un défaut au stator. On peut remarquer sur cette figure les raies qui apparaissent autour du fondamental et qui correspondent aux fréquences obtenues par la relation (3.16).

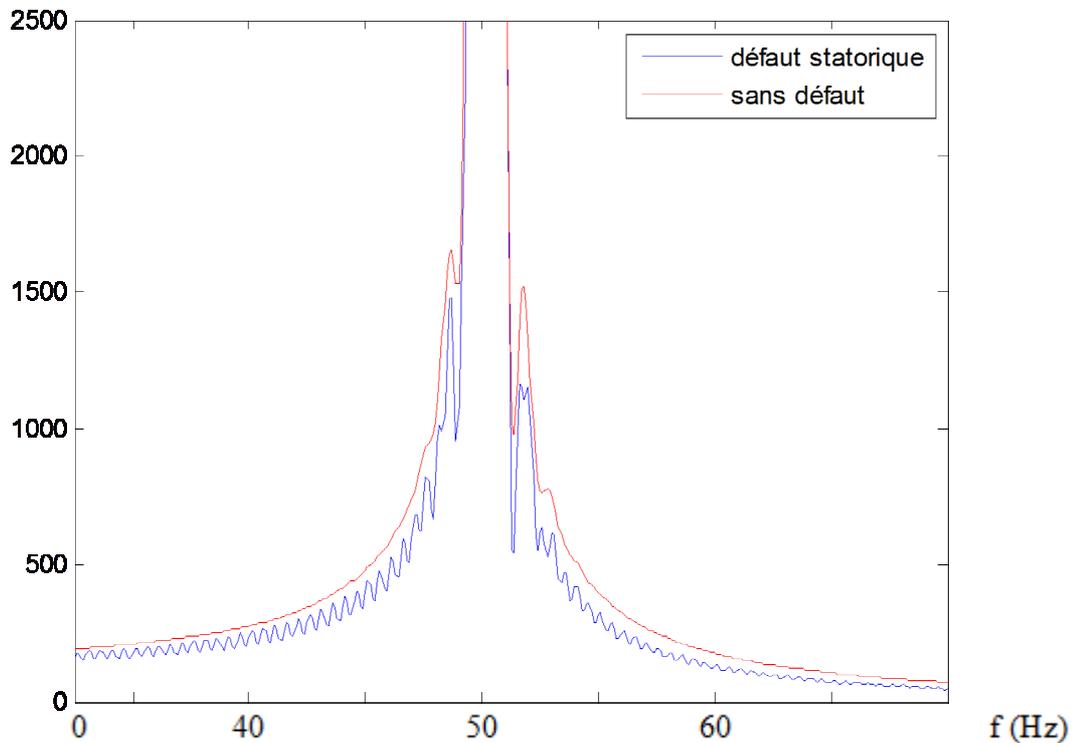


Fig.3.14 Spectre du courant statorique : défaut statorique

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons élaboré le modèle triphasé-triphasé de la machine asynchrone. Ce modèle qui représente réellement la machine et prend en compte le déséquilibre de l'alimentation s'avère le plus adéquat pour le diagnostic des défauts et avec le développement des microprocesseurs son implémentation en milieu industriel n'est plus un problème.

Ainsi, nous avons fait une discrimination des défauts en utilisant les symptômes de chaque défaut sur les grandeurs de la machine pour les simuler par des variations paramétriques.

Finalement, nous avons utilisé une analyse spectrale par FFT afin de prouver la cohérence de la simulation des défauts utilisée avec la réalité.

*Chapitre VI*

**DIAGNOSTIC DES DEFAUTS A  
BASE D'OBSERVATEURS**

## Chapitre IV : Diagnostic des défauts à base d'observateurs

### Introduction

Le choix de l'observateur dépend de la structure des modèles : linéaire ou non. On distingue deux approches : application directe sur le modèle non linéaire ou linéarisation autour d'un point de fonctionnement.

Dans ce chapitre nous allons présenter le principe de l'observateur et quelque type d'observateur linéaire et non linéaire et on abordera le problème FPRG.

Notre application sera portée sur l'utilisation de l'observateur par modes glissants et le filtre de Kalman étendu en diagnostic des défauts statoriques et rotoriques de la machine asynchrone.

### IV.1. Principe de l'observateur

#### IV.1.1 Observateurs pour les systèmes linéaires

Pour les systèmes linéaires, l'observabilité, c'est-à-dire la possibilité mathématique de reconstruire tout l'état à partir de l'entrée et des mesures, ne dépend pas de l'entrée appliquée. En conséquence, si un système est observable pour l'entrée nulle, alors il est observable pour toute entrée. Pour ce cas bien étudié, il existe des algorithmes parfaitement développés, tels que les observateurs de type Kalman-Luenberger.

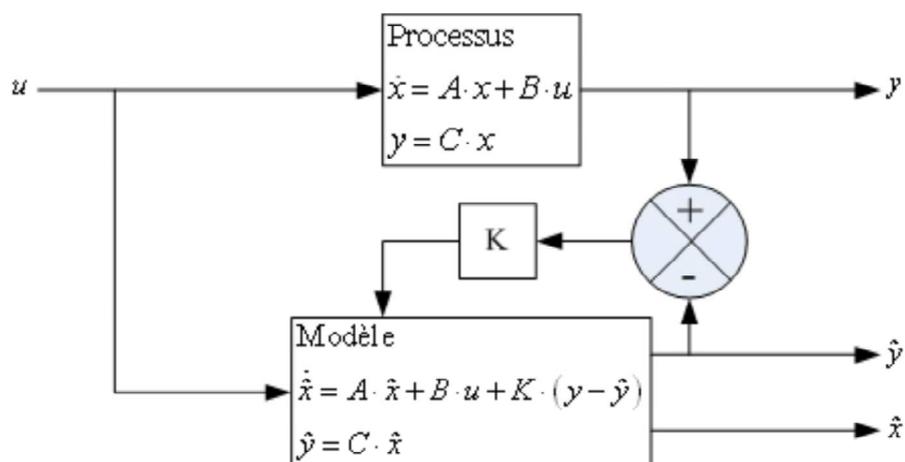


Fig.4.1.Principe d'un observateur d'état

Ce type d'estimateurs s'applique aux systèmes linéaires observables entièrement ou observables partiellement mais tels que tous les pôles de la partie inobservables sont asymptotiquement stables.

Soit le système mis sous la forme d'état suivante :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (4.1)$$

où :  $x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, y \in \mathbb{R}^p$  , et A,B et C ,et des matrices de dimensions appropriées.

**Définition** : Le système (ou la paire) est observable si et seulement si :

$$\text{Rang} [ C , CA , CA^2 , \dots , CA^n ] \quad (4.2)$$

Pour un système linéaire mis sous la forme d'état (4.1) l'observateur de Luenberger d'ordre plein est un système dynamique d'état  $\hat{x}$  défini par la valeur estimée initiale  $\hat{x}(0) = \hat{x}_0$  et une équation différentielle de la forme:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K(y - \hat{y}) \quad (4.3)$$

Où : L représente le gain de l'observateur.

La sortie prédite est donnée par :

$$\hat{y} = C\hat{x} \quad (4.4)$$

Et l'erreur d'observation est définie par :

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (4.5)$$

La dynamique de cette erreur est alors régie par:

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \\ \dot{e}(t) &= (A - KC)e(t) \end{aligned} \quad (4.6)$$

Pour que cette erreur d'observation converge asymptotiquement vers zéro, il faut choisir K tel que: (A-KC) soit stable.

Afin de générer des résidus directionnels le gain est choisi de telle manière que l'erreur de sortie ait une direction unique associée à certaines directions de défauts connus. Plus précisément, le résidu est fixé selon une direction prédéterminée pour un défaut d'actionneur ou reste dans un espace spécifique pour un défaut de capteur ou système. Puisque l'information requise pour isoler les défauts est comprise dans la direction du résidu

plutôt que dans sa variation temporelle, ces algorithmes de détection de défauts ne requièrent aucune connaissance sur les profils temporels de défauts. Le problème de l'isolation de défauts se ramène à comparer la direction de résidus avec les directions de défauts prédéfinis.

### IV.1.2 Observateurs pour les systèmes non linéaires

Pour les systèmes linéaires, la propriété d'observabilité caractérisée par une condition de rang, garantit la possibilité de concevoir un observateur. Cependant, avant de se lancer dans la recherche d'un observateur non linéaire, on doit se demander si on peut espérer une solution. La notion d'observabilité et certaines propriétés des entrées appliquées au système fournissent des conditions nécessaires à la synthèse d'un observateur. Une définition de ce concept est la suivante: un système non linéaire est observable si, étant donnés deux conditions initiales,  $x_0 = \bar{x}_0$  il existe une entrée  $u$  telles que les solutions correspondantes  $x_0(t)$  et  $\bar{x}_0(t)$  et sont telles que  $h(x(t)) \neq h(\hat{x}(t))$  que pour tout  $t$  dans un ensemble de mesures non nulles.

Les premières solutions théoriques proposées pour les systèmes non linéaires consistaient souvent à se ramener d'une façon ou d'une autre aux systèmes linéaires, selon la structure du système vis-à-vis de ces non linéarités. On peut par exemple synthétiser un observateur linéaire pour un système qui, pour un choix judicieux des variables d'état, peut être décrit par une représentation où toutes les non linéarités dépendent uniquement de variables mesurées. Plusieurs méthodes sont ainsi développées pour trouver si possible de tels choix de variables d'état.

D'autres approches ont été proposées, citons celle basée sur l'utilisation des fonctions de Lyapunov dans l'étude des équations dynamiques de l'erreur d'estimation. Généralement, l'application des résultats correspondants suppose que le système observé possède une structure mathématique particulière pour qu'une fonction de Lyapunov convenable puisse être trouvée analytiquement, ce qui est difficilement utilisable dans la pratique.

Pour les systèmes admettant une linéarisation exacte par changement de variable ou pouvant être mis sous forme canonique d'observabilité, des observateurs du type Luenberger ont été proposés. Ces observateurs généralisent directement la structure classique des observateurs linéaires au cas des systèmes non linéaires vérifiant les hypothèses ci-dessus. Encore une fois, ces conditions hautement structurelles rendent ces observateurs difficilement utilisables pour des systèmes non linéaires généraux.

Les observateurs à grand gain ont été proposés pour les systèmes non linéaires affines en la commande et dont la partie non linéaire possède une structure triangulaire.

Outre cette condition structurelle difficile à mettre en évidence même lorsqu'elle existe potentiellement, ces observateurs souffrent d'une conséquence immédiate de leur structure même, à savoir l'amplification des bruits de mesure du fait du grand gain utilisé dans la dynamique de l'observateur.

En pratique, le filtre de Kalman étendu est souvent utilisé, il est basé sur la linéarisation du modèle autour de l'estimée courante. Il est peu coûteux en temps de calcul et donne de bonnes performances pour le système à non linéarités modérées. Mais dès que les non linéarités deviennent trop fortes ou s'il est mal initialisé, ce filtre peut fournir des résultats aberrants. [1]

## **IV.2 Génération des résidus**

L'idée principale, des méthodes de génération du vecteur résidu à base d'observateurs, consiste à estimer une partie ou l'ensemble des mesures du système surveillé à partir des grandeurs mesurables. Le résidu est alors généré en formant la différence, éventuellement filtrée, entre les sorties estimées et les sorties réelles. L'observateur revient finalement à un modèle parallèle au système avec une contre réaction qui pondère l'écart de sortie. Ce principe est illustré sur la figure (Fig.4.2).[24] [13]

### **IV.2.1 Problème fondamental de génération des résidus**

Le problème de détection et de localisation des défauts, par les méthodes à base d'observateurs, revient à un problème de génération de résidus (FPRG). Ces derniers doivent être dotés de propriétés assurant leur sensibilité aux défauts que l'on veut détecter tout en rejetant les perturbations, d'une part, et de propriétés permettant la distinction entre les différents défauts agissant sur le système, d'autre part. Dans le premier cas, on parle de découplage et dans le second de structuration des résidus.

### **IV.2.2 Découplage**

Le problème fondamental de génération de résidus FPRG, dans ce cas, consiste à concevoir un générateur de résidus de manière à satisfaire les conditions suivantes :

- Le résidu est robuste vis-à-vis des entrées inconnues et la commande.
- Le résidu est sensible aux défauts à détecter.

- Le résidu converge asymptotiquement vers zéro en absence de défauts.

### IV.2.3 Structuration des résidus

Le FPRG, dans ce cas, stipule que les résidus doivent permettre la distinction entre les défauts agissant sur le système. Si l'on dispose d'un seul observateur générant un vecteur résidu, ce dernier doit être non seulement de dimension égale au nombre de défauts mais aussi, il doit posséder la propriété suivante

$$\begin{pmatrix} r_1(t) \\ r_2(t) \\ \vdots \\ r_q(t) \end{pmatrix} \leftarrow \begin{matrix} \text{composante sensible au défaut } f_1 \\ \text{composante sensible au défaut } f_2 \\ \vdots \\ \text{composante sensible au défaut } f_q \end{matrix} \quad \text{avec } q = \dim(f(t))$$

Cette structure du vecteur résidu est difficile à établir. Il est préférable de considérer un banc d'observateurs. Ainsi les contraintes de construction ne se concentrent plus sur un unique observateur mais se répartissent sur l'ensemble. Il existe trois structures d'observateurs connues à savoir:

#### II.2.3.1 Structure d'observateur simplifié (SOS)

Dans ce cas, un seul observateur constitue le banc. Il est synthétisé de sorte à n'être sensible qu'à un groupe de défauts. Si un des défauts auquel est sensible l'observateur apparaît alors les estimations sont erronées. Dans le cas contraire, elles sont exactes.

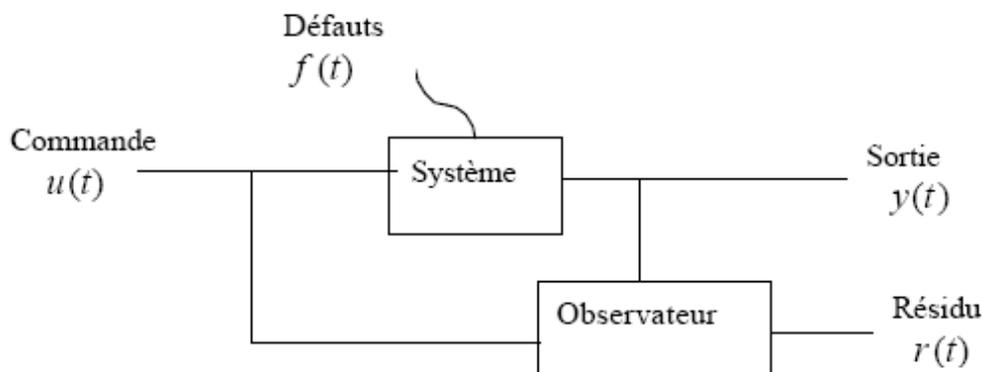


Fig.4.2. Structure d'observateur simplifié

### II.2.3.2 Structure d'observateurs dédiés (DOS)

Cette structure consiste à synthétiser autant d'observateurs que de défauts. Chacun de ces observateurs permet la génération d'un résidu insensible à tous les défauts sauf un. L'occurrence du défaut est indiquée par l'observateur, source d'une mauvaise estimation. Ce dernier n'est sensible qu'à un seul défaut et permet donc sa détection et sa localisation. Cette structure donne de bons résultats mais elle n'est pas toujours possible et ne permet pas de s'affranchir des entrées inconnues et des bruits.

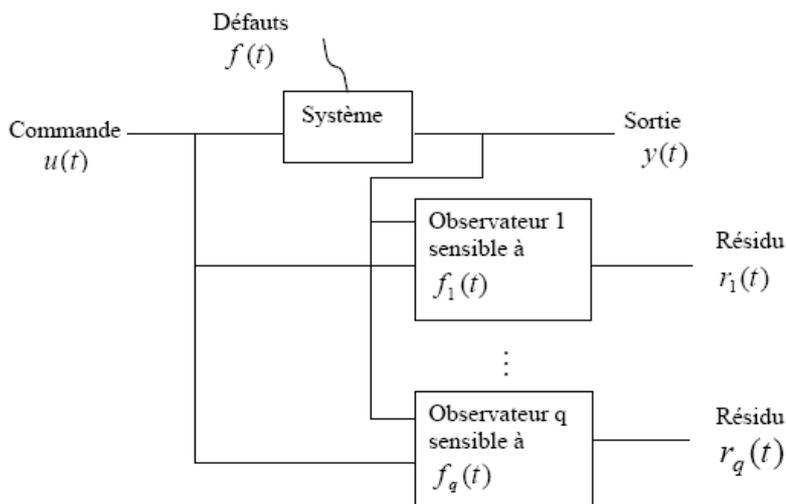


Fig.4.3. Structure d'un observateur dédié

### II.2.3.3 Structure d'observateurs généralisés (GOS)

Ce cas consiste à synthétiser  $q$  observateurs, chacun d'entre eux étant insensible à un seul défaut. Si un défaut apparaît, l'estimation de l'ensemble du sous espace d'état sensible à ce défaut est erronée si elle ne provient pas de l'observateur insensible à ce seul défaut.

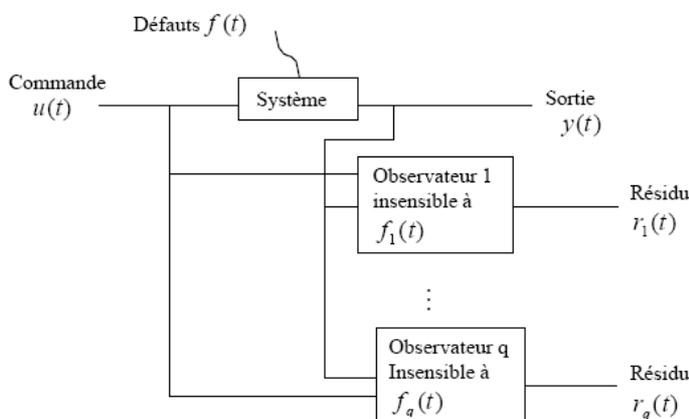


Fig.4.4. Structure d'un observateur généralisé

### **IV.3 Méthode d'évaluation des résidus**

Plusieurs méthodes FDI robustes visent à Construire des résidus insensibles aux entrées inconnues. En pratique, on trouvera rarement une situation où les conditions pour générer des résidus parfaitement robustes sont satisfaisantes. Ceci est dû généralement aux incertitudes structurées et/ou non structurées. Cependant les efforts d'améliorer la robustesse des systèmes de supervision peuvent être aussi considérés dans la phase de décision. Par conséquent, il est nécessaire d'assurer une robustesse suffisante non seulement dans la phase de génération de résidu mais aussi dans la phase d'évaluation.

L'objectif principal de l'évaluation robuste est de rendre fiable la détection et l'isolation de défauts dans le but est de minimiser le taux de fausses alarmes et de la non détection due aux entrées inconnues.

#### **IV.3.1 Choix de seuil approprié**

Quand le découplage parfait n'est pas possible, les fonctions de décision calculées à partir des résidus sont corrompues par les entrées inconnues. En pratique, pour évaluer ces fonctions, on définit les seuils auxquels les fonctions de décision sont comparées.

Normalement, on utilise des seuils fixes; mais ceci introduit l'inconvénient de mal gérer le compromis détection / fausses alarmes, ce qui justifie l'emploi des seuils adaptatifs.

La figure (Fig.4.5) montre une forme typique d'un seuil adaptatif pour une évaluation de résidu direct.

Cette approche est basée sur un choix adaptatif des seuils c'est à dire des seuils variables. L'idée étant en présence des entrées inconnues, le résidu ainsi que la fonction de décision correspondante fluctuent avec les changements des entrées même en absence des défauts.

En cas de fluctuations importantes, ceci peut introduire de fausses alarmes, de plus il n'existe pas de seuil choisi qui permet une détection satisfaisante de défaut avec un taux de fausses alarmes acceptables. Afin d'améliorer la robustesse dans de telles situations, il est possible d'utiliser des seuils adaptatifs où le seuil varie en fonction des entrées du système.

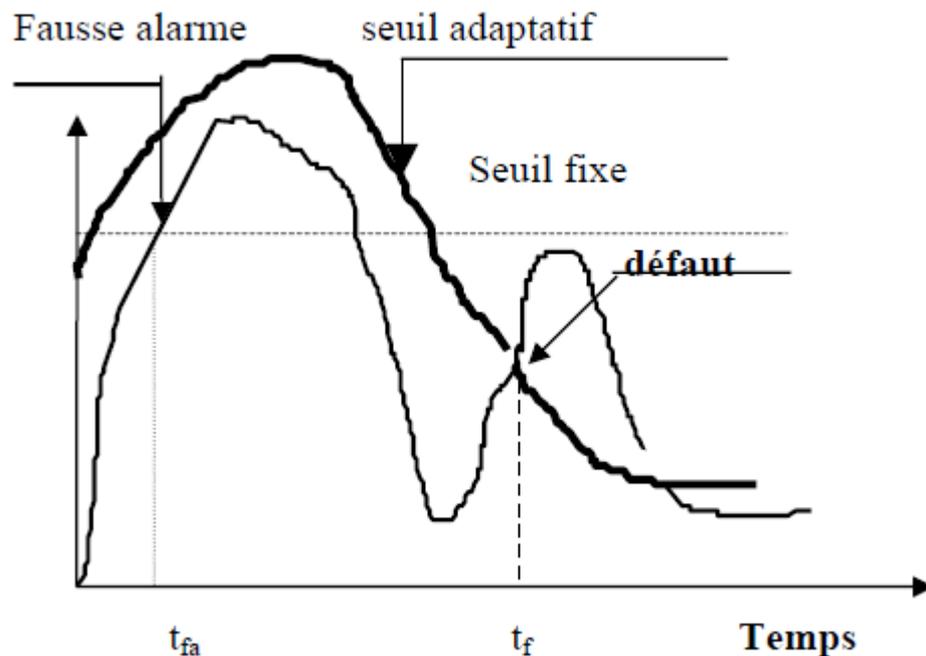


Fig.4.5 Seuil de détection adaptatif

### IV.3.2 Evaluation de résidu en utilisant l'approche floue.

L'évaluation floue est une procédure de décision logique qui transforme les connaissances quantitatives en des connaissances qualitatives. Son principe comporte trois étapes : en premier les résidus sont fuzzifiés, puis ils sont évalués par le mécanisme d'inférence en utilisant les règles de type ( Si-alors) et enfin ils sont défuzzifiés.

#### IV.3.2.1 Stratégie de fuzzification

La fuzzification consiste à convertir les valeurs numériques en des valeurs linguistiques via des fonctions d'appartenance, cette conversion n'aura lieu qu'après une projection de ces valeurs dans l'univers de discours en utilisant un facteur d'échelle. Dans le contexte de diagnostic de défaillances , ceci peut aussi être interprétée comme une fuzzification du seuil.

#### IV.3.2.2 Mécanisme d'inférence

C'est le noyau du mécanisme flou, il contient les informations nécessaires utilisées pour l'exploitation des règles. Ces règles caractérisent le comportement du système dans les conditions de fonctionnement normal ou de dysfonctionnement. Elles ont la forme

si « effet » alors « cause »

### **IV.3.2.3 Défuzzification.**

Elle consiste à calculer les valeurs réelles de la sortie floue à partir des valeurs de vérité, autrement elle permet de calculer les valeurs numériques. La sortie de la procédure de décision est une valeur qui exprime une indication soit sur la taille du défaut présent, soit sur sa certitude.

### **IV.3.3 Seuil adaptatif flou**

La théorie de la logique floue est appliquée avec succès dans le domaine de diagnostic des systèmes incertains. Au lieu d'utiliser des relations analytiques, le concept flou permet de déterminer des relations floues qui sont exprimées par des implications floues.

Le seuil est adapté suivant les variations des entrées  $u$  et des sorties  $y$  en terme de règles entre les ensembles flous qui sont spécifiées par des fonctions. La relation résultante pour le seuil adaptatif flou est donnée par :

$$J(u, y) = J_0 + \Delta J(u, y) \quad (4.7)$$

Où  $j_0 = j_0(u_0, y_0)$  est le seuil nominal constant due à l'influence des perturbations et des bruits.

$\Delta J(u, y)$  représente les effets des erreurs de modélisation. [18]

Dans ce travail, nous allons utiliser des seuils de détection fixes afin de détecter et localiser les défauts. La forme des résidus en cas d'absence ou présence de défaut et de perturbations justifie ce choix.

## **IV.4 Observabilité de la machine asynchrone**

La synthèse d'un observateur nécessite une étude d'observabilité du système. Nous allons étudier l'observabilité faible de la machine en utilisant les dérivées de Lie.

Nous allons utiliser la condition d'observabilité générique exposée dans [10]. Lorsque cette condition est satisfaite, on peut alors vérifier :

$$\text{rang} \frac{d}{dI} \begin{pmatrix} h \\ L_f h \\ \vdots \\ L_f^{n-1} h \end{pmatrix} = n \quad \text{avec} \quad [I] = [I_{sa} \ I_{sb} \ I_{sc} \ I_{ra} \ I_{rb} \ I_{rc}]$$

$L_f$  l'opération dérivée de Lie

Pour le modèle de la machine asynchrone suivant :

$$[\dot{I}] = [L]^{-1}([V] - ([R] + [G]\omega)[I]) \quad (4.8)$$

Nous obtenons :

$$h = \begin{pmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \frac{dh}{dI} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$L_f h = \frac{dh}{dI} * [L]^{-1}([V] - ([R] + [G]\omega)[I]) \quad \text{et} \quad \frac{dL_f h}{dI} = \frac{dh}{dI} * [L]^{-1}([R] + [G]\omega)$$

A cause de la complexité du système et la difficulté d'effectuer un tel calcul, la condition du rang d'observabilité a été vérifiée avec le toolbox du calcul symbolique de MATLAB et nous avons obtenu le résultat suivant :

$$\text{rang} \begin{pmatrix} \frac{dh}{dI} \\ \frac{dL_f h}{dI} \end{pmatrix} = 6$$

$$\text{donc} \quad \text{rang} \begin{pmatrix} \frac{dh}{dI} \\ \frac{dL_f h}{dI} \end{pmatrix} = \dim[I] = 6$$

Alors on peut dire que le modèle triphasé-triphasé de la machine asynchrone est complètement faiblement observable.

On remarque aussi que cette notion d'observabilité dépend du type d'entrée employée ; une tension triphasée dans notre cas. Le système est observable avec cette entrée.

Ce résultat nous permet de synthétiser par la suite des observateurs non linéaires d'ordre complet.

## IV.5 Application

### IV.5.1 Observateur par modes glissants

#### IV.5.1.1 Présentation

L'observateur par modes glissants c'est un observateur qui ne fait aucune supposition sur les bruits et les erreurs d'origine diverses. Il utilise une simple fonction de signe pour déterminer si le vecteur d'état et de mesure sont proches ce qui garantit la robustesse contre les variations paramétriques et les bruits de mesure. La notion du gain intervient pour donner plus de poids à cette fonction signe suivant les dynamiques des grandeurs observées et la qualité de la mesure. [21] [32][33]

Pour concevoir un tel observateur nous devons élaborer une fonction  $S$  appelée surface de glissement qui doit vérifier deux conditions [7][14][35][16][6]

- $S = 0$  condition d'invariance
- $S \cdot \dot{S} < 0$  condition d'attractivité

La surface  $S$  est le vecteur d'erreur entre les états prédits et de mesure choisie comme suit :

$$S = (I_s - \hat{I}_s) \quad (4.9)$$

Ou  $I_s$  et  $\hat{I}_s$  représentent les trois courants statorique et leurs estimés respectivement.

L'observateur en modes glissants est donné par :

$$[\dot{\hat{I}}] = [L]^{-1}([V] - ([R] + [G]\omega)[\hat{I}]) + K * Si \quad (4.10)$$

Avec

$K$  gain de l'observateur

$$Si^T = [ \text{sign}(I_{sa} - \hat{I}_{sa}) \quad \text{sign}(I_{sb} - \hat{I}_{sb}) \quad \text{sign}(I_{sc} - \hat{I}_{sc}) ] \quad (4.11)$$

La synthèse de l'observateur par modes glissants est détaillée dans l'annexe B.

Pour la simulation nous utilisons la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 avec un pas d'échantillonnage de  $10^{-3}$ s

Les résultats de simulation sont présentés sur les figures suivantes:

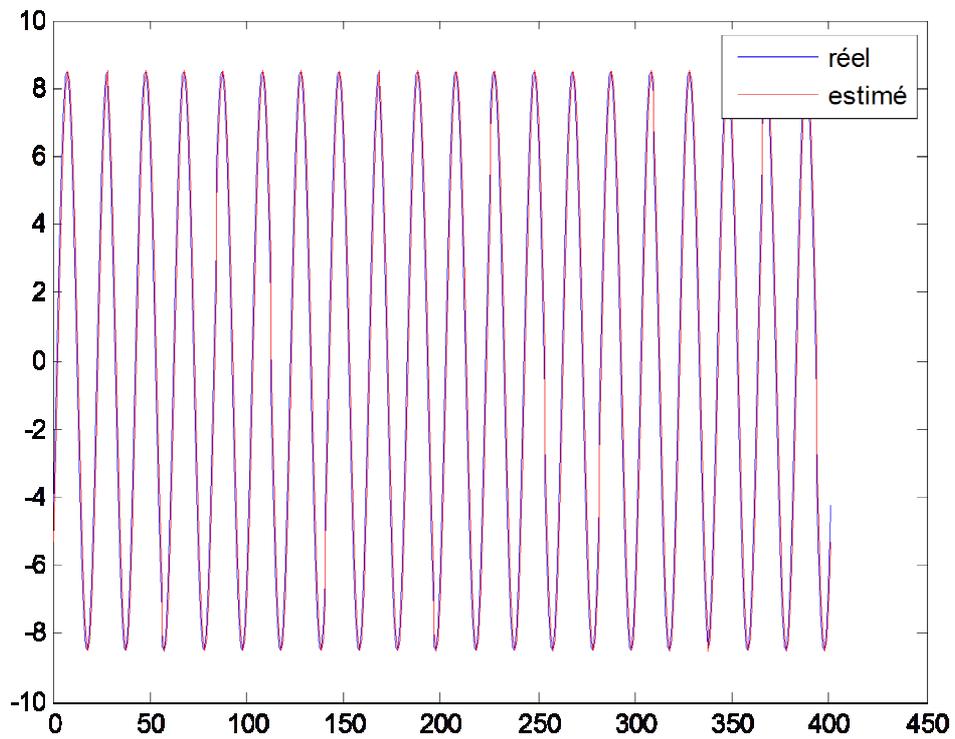


Fig.4.6.Courant statorique

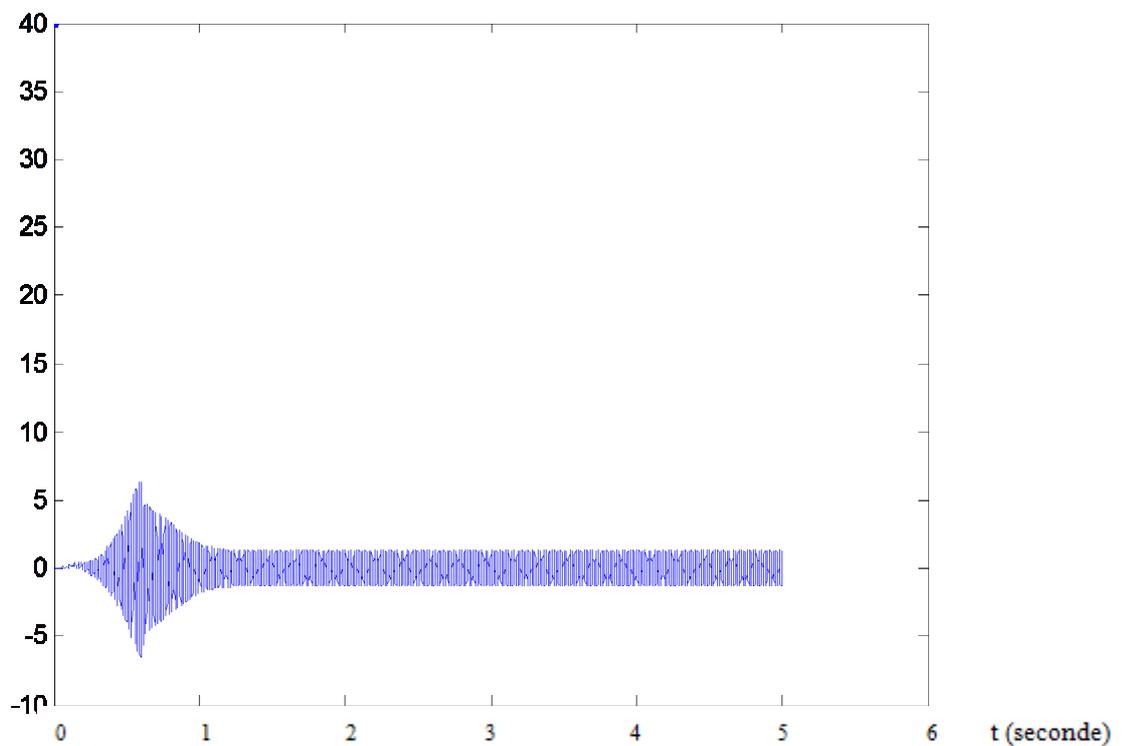


Fig.4.7.Erreur d'observation

### IV.5.1.2 Evaluation des résidus

En utilisant les grandeurs mesurées, Quatre résidus vont être utilisés pour détecter les défauts au niveau du stator et du rotor :

$$\begin{aligned} \hat{r}_1 &= -\cos\left(p.\theta + 2.\frac{\pi}{3}\right).(\text{sign}(I_{s1} - \hat{I}_{s1}) + \text{sign}(I_{s2} - \hat{I}_{s2}) + \text{sign}(I_{s3} - \hat{I}_{s3})) \\ \hat{r}_2 &= -\cos(p.\theta).(\text{sign}(I_{s1} - \hat{I}_{s1}) + \text{sign}(I_{s2} - \hat{I}_{s2}) + \text{sign}(I_{s3} - \hat{I}_{s3})) \\ \hat{r}_3 &= -\cos\left(p.\theta - 2.\frac{\pi}{3}\right).(\text{sign}(I_{s1} - \hat{I}_{s1}) + \text{sign}(I_{s2} - \hat{I}_{s2}) + \text{sign}(I_{s3} - \hat{I}_{s3})) \\ \hat{r}_4 &= \text{sign}(I_{s1} - \hat{I}_{s1}) + \text{sign}(I_{s2} - \hat{I}_{s2}) \end{aligned} \quad (4.12)$$

Les figures suivantes représentent les résidus en absence de défaut et de perturbation, en présence de perturbation et en présence d'un défaut statorique et rotorique à l'instant t=2s :

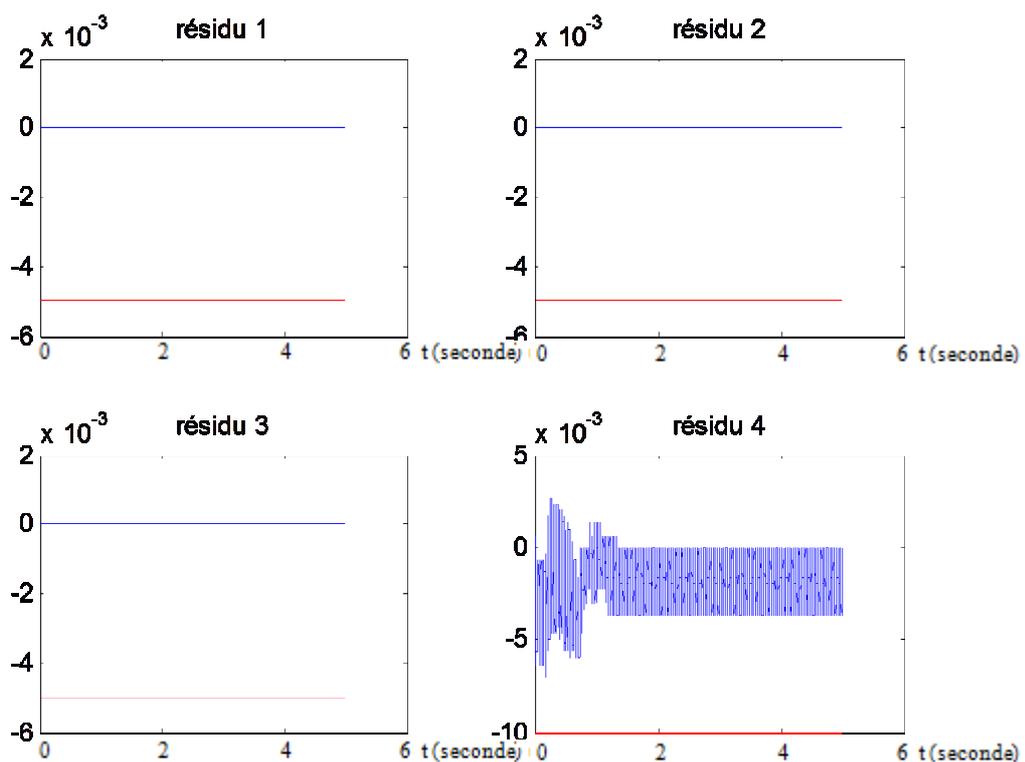


Fig.4.8.Résidus en absence de défauts et perturbations

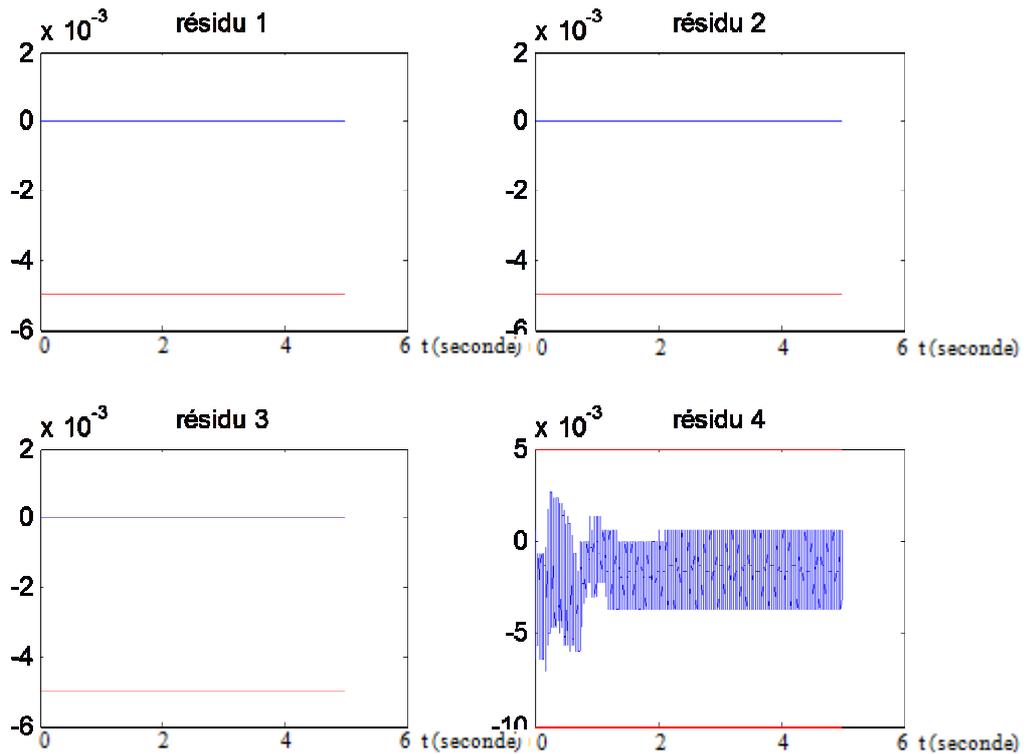


Fig.4.9. Résidus en présence de perturbations

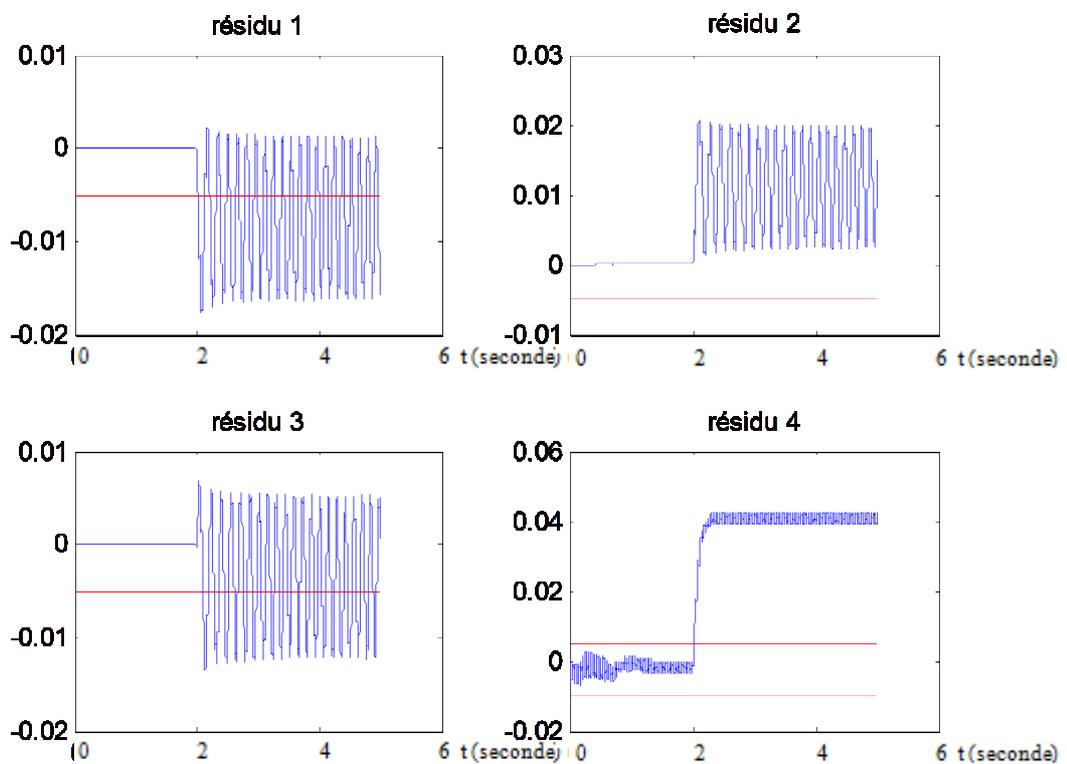


Fig.4.10. Résidus en présence d'un défaut statorique sur la phase 1

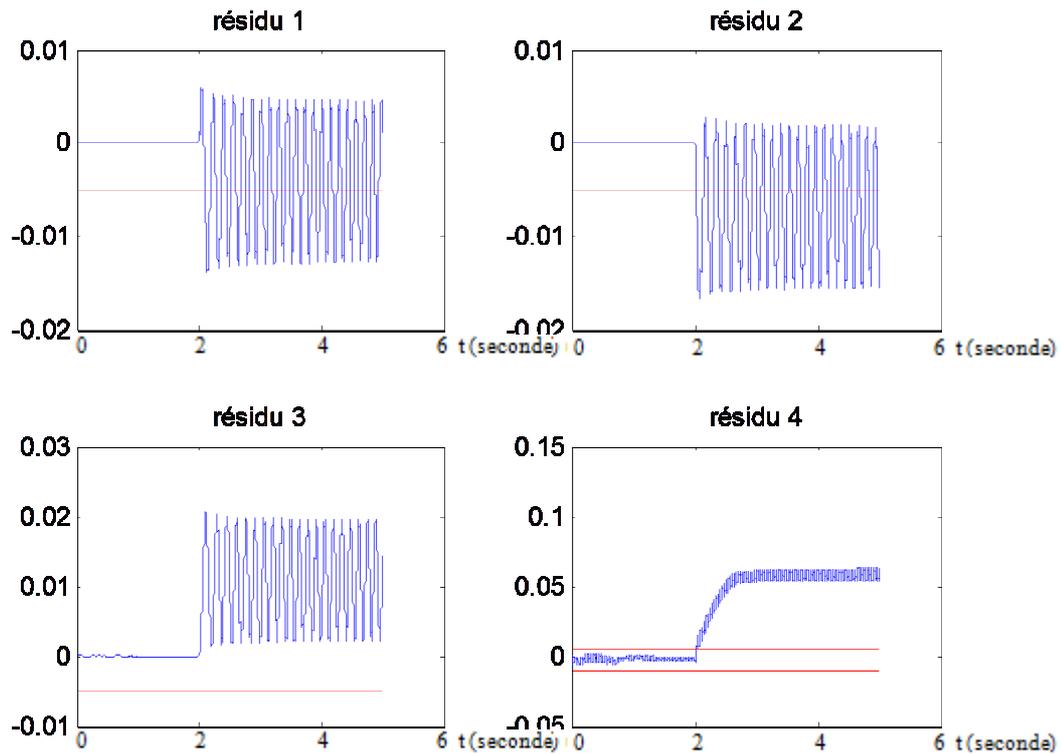


Fig.4.11. Résidus en présence d'un défaut statorique sur la phase 2

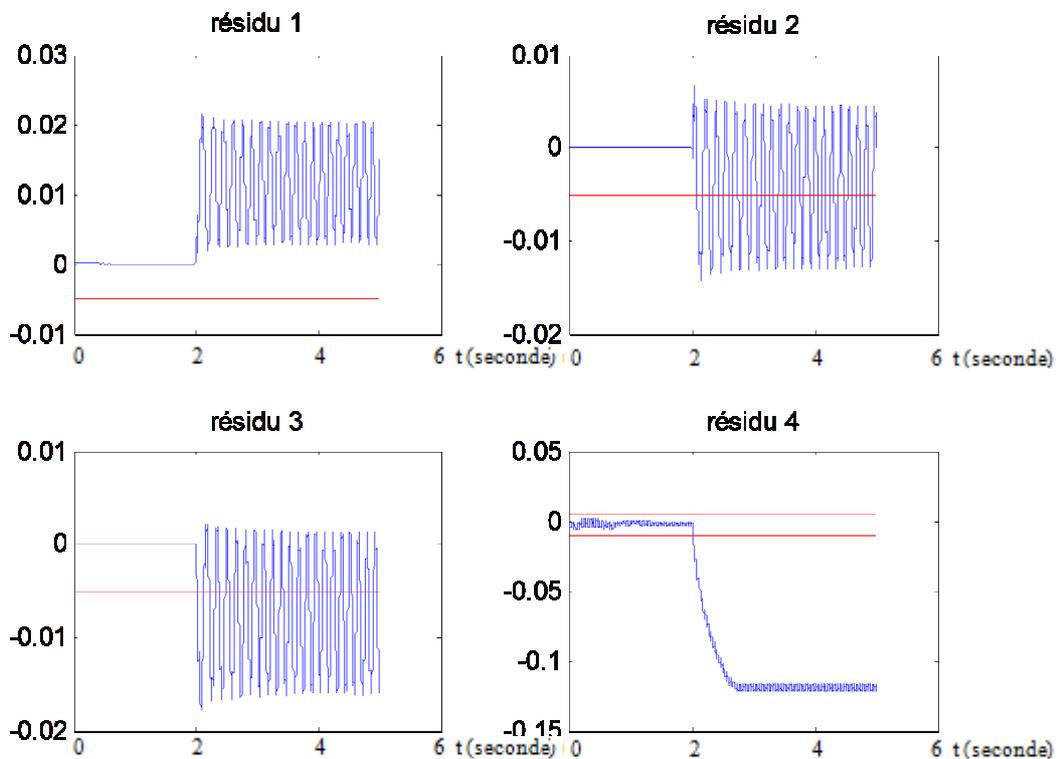


Fig.4.12. Résidus en présence d'un défaut statorique sur la phase 3

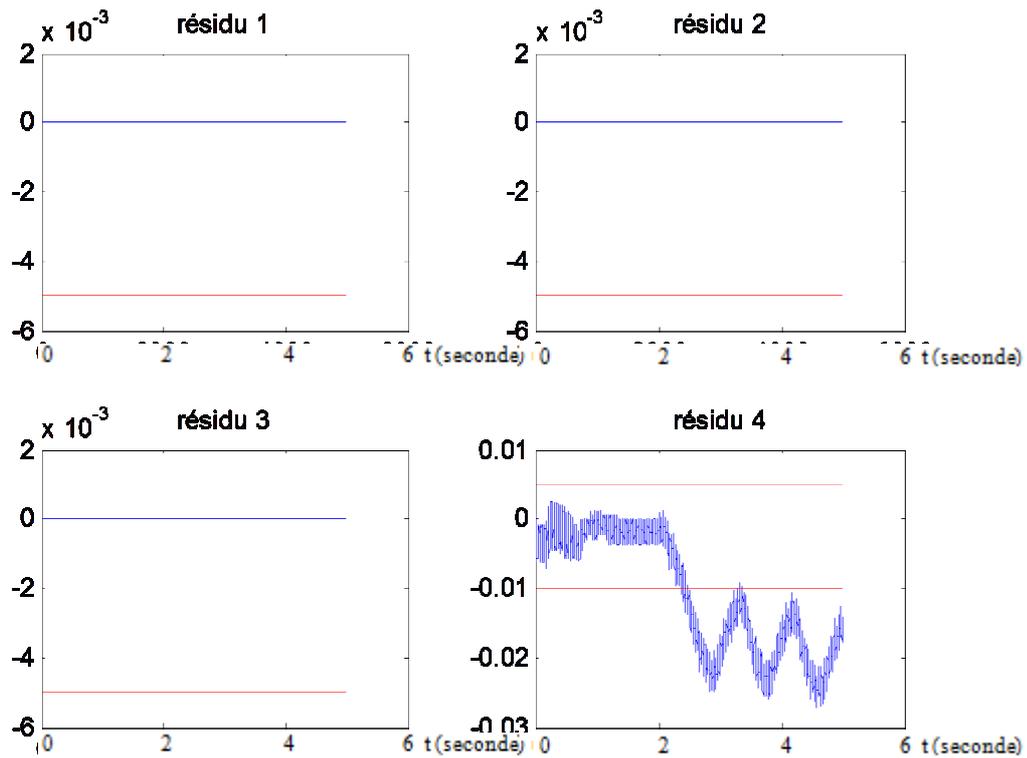


Fig.4.13.Résidus en présence d'un défaut rotorique

- La figure Fig.4.7 montre que les résidus ont une valeur moyenne sensiblement nulle en absence de défauts et de perturbations.
- La figure Fig.4.8 montre que les résidus sont insensibles aux perturbations
- Les figures Fig.4.9, Fig.4.10, Fig.4.11 et Fig.4.12 représentent les différentes configurations des résidus en cas de défaut. La table des signatures suivantes illustre ces configurations :

	r1	r2	r3	r4
Stator phase 1	1	0	1	1
Stator phase 2	1	1	0	1
Stator phase 3	0	1	1	1
Rotor	0	0	0	1

Tab.4.1 Table des signatures (Observateur en mode glissant)

On remarque que le passage entre deux configurations de cette table nécessite au moins deux changements donc la table est fortement localisante. [13]

## IV.5.2 Filtre de Kalman

### IV.5.2.1 Présentation

Pour un système non linéaire mis sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) + W_x \\ y = h(x, u) + W_y \end{cases} \quad (4.12)$$

$W_x$  et  $W_y$  sont des bruits blancs gaussiens.

L'observateur de Kalman étendu sera de la forme :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) - R \left( \frac{\partial h(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \right)^T (h(\hat{x}) - y) \\ \dot{R} = Q + \left( \frac{\partial f(\hat{x}, u)}{\partial \hat{x}} \right) R + R \left( \frac{\partial f(\hat{x}, u)}{\partial \hat{x}} \right)^T - R \left( \frac{\partial h(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \right)^T \left( \frac{\partial h(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \right) R \end{cases} \quad (4.13)$$

L'observation se fait en deux étapes : une étape de prédiction  $\dot{x} = f(x, u)$  qui consiste à évaluer les variables d'état à partir des équations du modèle, la seconde étape est celle de la correction  $R \left( \frac{\partial h(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \right)^T (h(\hat{x}) - y)$  qui consiste à corriger l'erreur de prédiction sur les variables en utilisant les différences existantes entre les variables mesurées et celle observées.

La matrice Q est constante. La matrice R est initialisé à un état donné et son évolution dépend de la résolution des équations différentielles (4.). Elles sont symétriques définies positives et leur réglage a une influence majeure sur le comportement de l'observateur (la dynamique et la stabilité). [3] [27] [11]

La IVtesse est injectée dans le modèle comme fait précédemment avec le mode glissant. Le modèle utilisé est de la forme :

$$[\dot{I}] = [L]^{-1}([V] - ([R] + [G]\omega)[I]) \quad (4.14)$$

Le développement de l'observateur est détaillé dans l'annexe C.

Pour la simulation nous utilisons la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 avec un pas d'échantillonnage de  $10^{-4}$ s.

Les résultats de simulation sont présentés sur les figures suivantes:

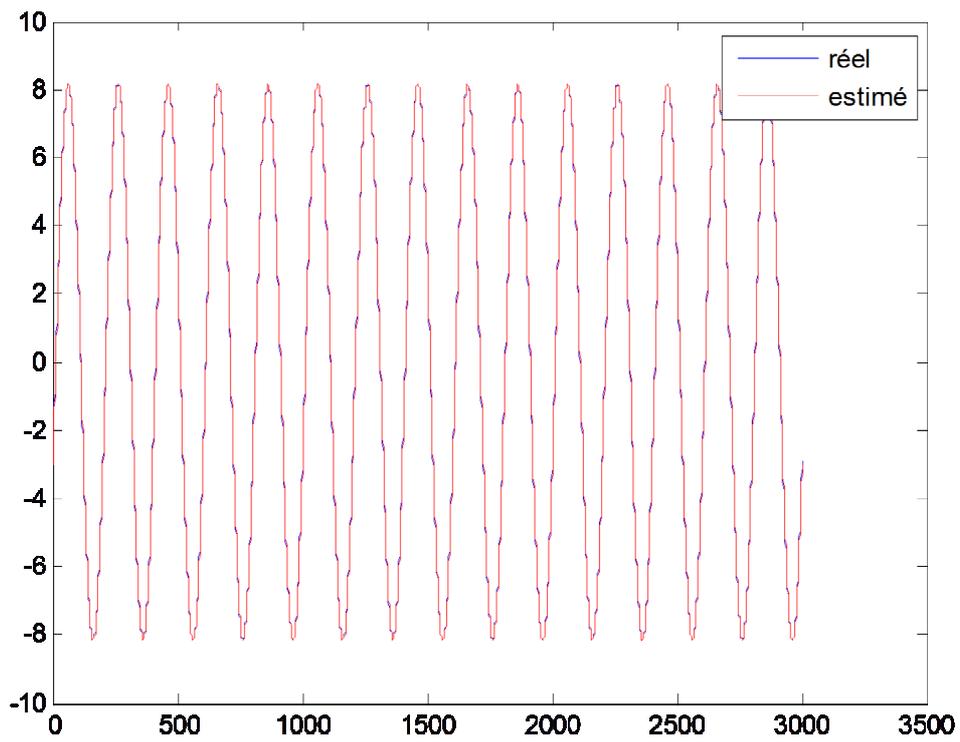


Fig.4.14. Courant statorique

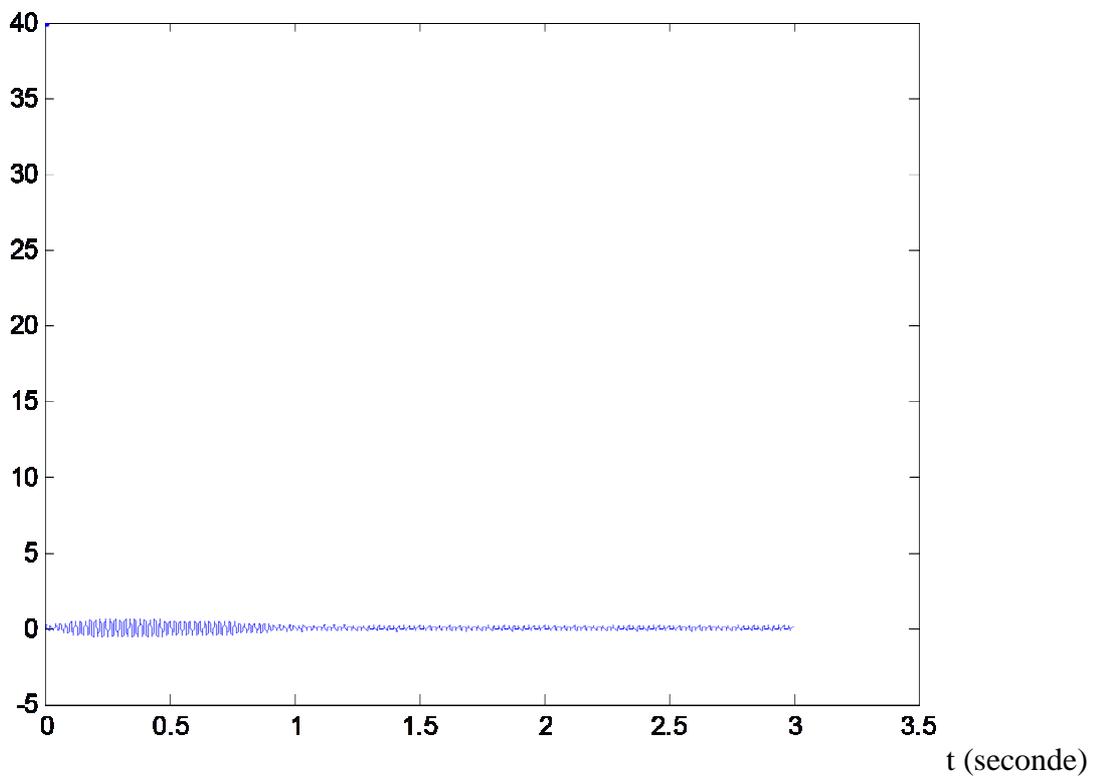


Fig.4.15. Erreur d'observation

### IV.5.2.2 Evaluation des résidus

En utilisant les grandeurs mesurées, Quatre résidus vont être utilisés pour détecter les défauts au niveau du stator et du rotor :

$$\begin{aligned}
 \dot{r}_1 &= -\cos\left(p.\theta + 2.\frac{\pi}{3}\right) \cdot ((I_{s1} - \hat{I}_{s1}) + (I_{s2} - \hat{I}_{s2}) + (I_{s3} - \hat{I}_{s3})) \\
 \dot{r}_2 &= -\cos(p.\theta) \cdot ((I_{s1} - \hat{I}_{s1}) + (I_{s2} - \hat{I}_{s2}) + (I_{s3} - \hat{I}_{s3})) \\
 \dot{r}_3 &= -\cos\left(p.\theta - 2.\frac{\pi}{3}\right) \cdot ((I_{s1} - \hat{I}_{s1}) + (I_{s2} - \hat{I}_{s2}) + (I_{s3} - \hat{I}_{s3})) \\
 \dot{r}_4 &= -\cos\left(p.\theta + 2.\frac{\pi}{3}\right) \cdot (I_{s1} - \hat{I}_{s1}) - \cos(p.\theta) \cdot (I_{s2} - \hat{I}_{s2}) - \cos\left(p.\theta - 2.\frac{\pi}{3}\right) \cdot (I_{s3} - \hat{I}_{s3})
 \end{aligned}
 \tag{4.15}$$

Les figures suivantes représentent les résidus en absence de défaut et de perturbation, en présence de perturbation et en présence d'un défaut statorique et rotorique à l'instant  $t=1.5s$  :

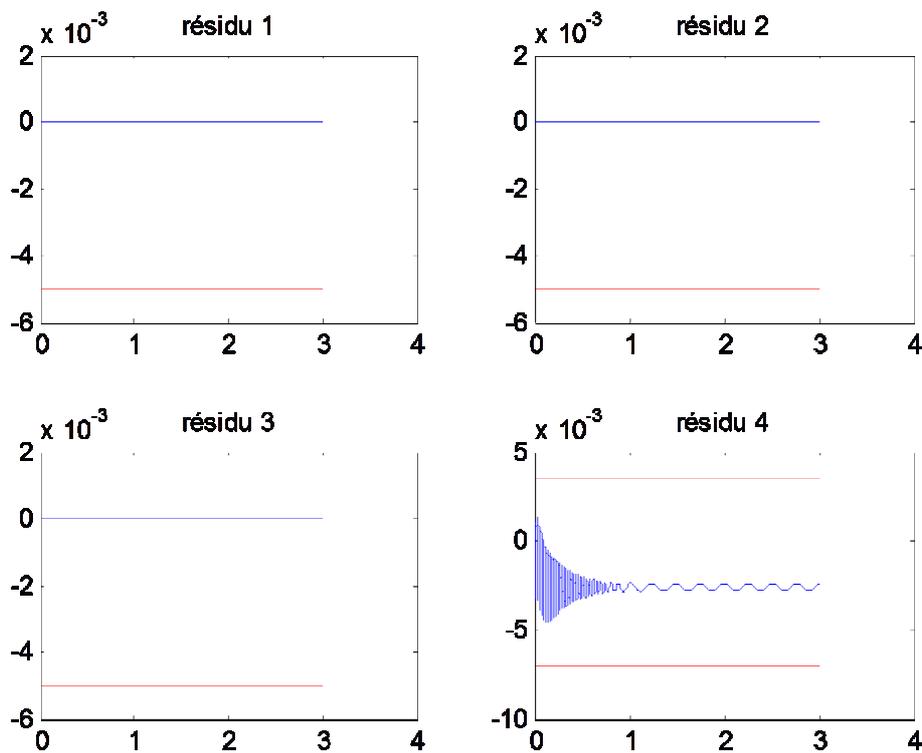


Fig.4.16.Résidus en absence de défauts et perturbations

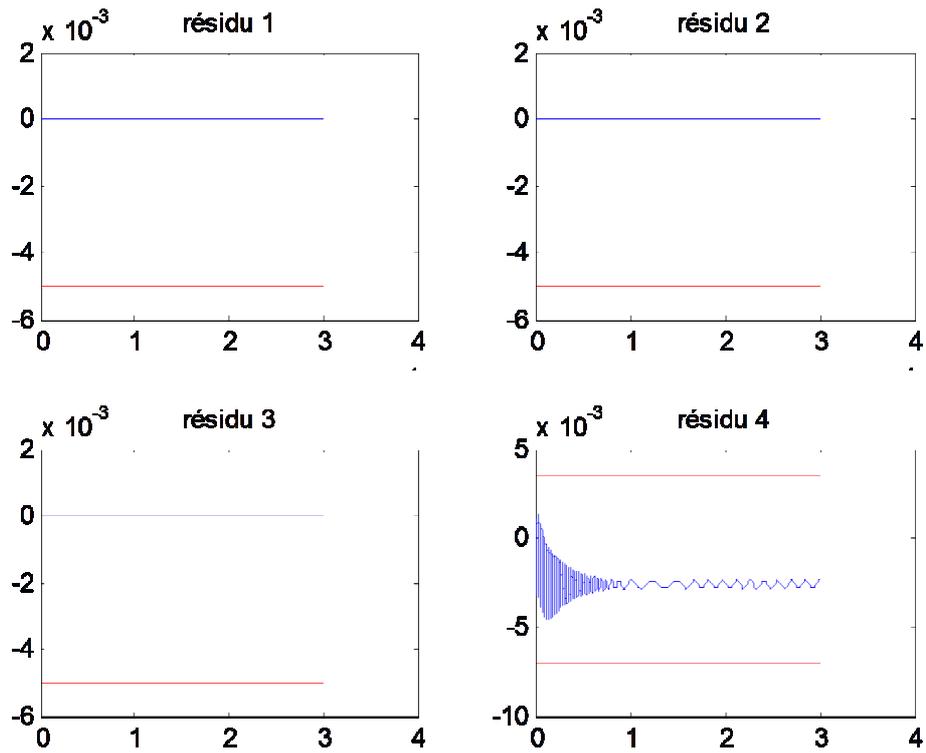


Fig.4.16. Résidus en présence de perturbations

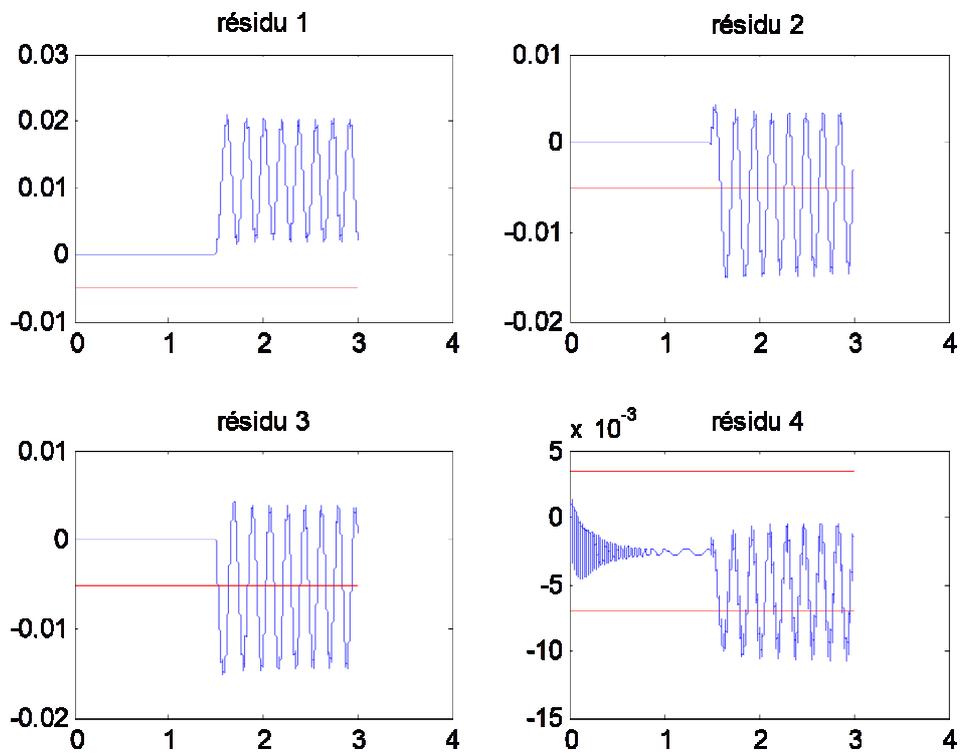


Fig.4.18. Résidus en présence d'un défaut statorique sur la phase 1

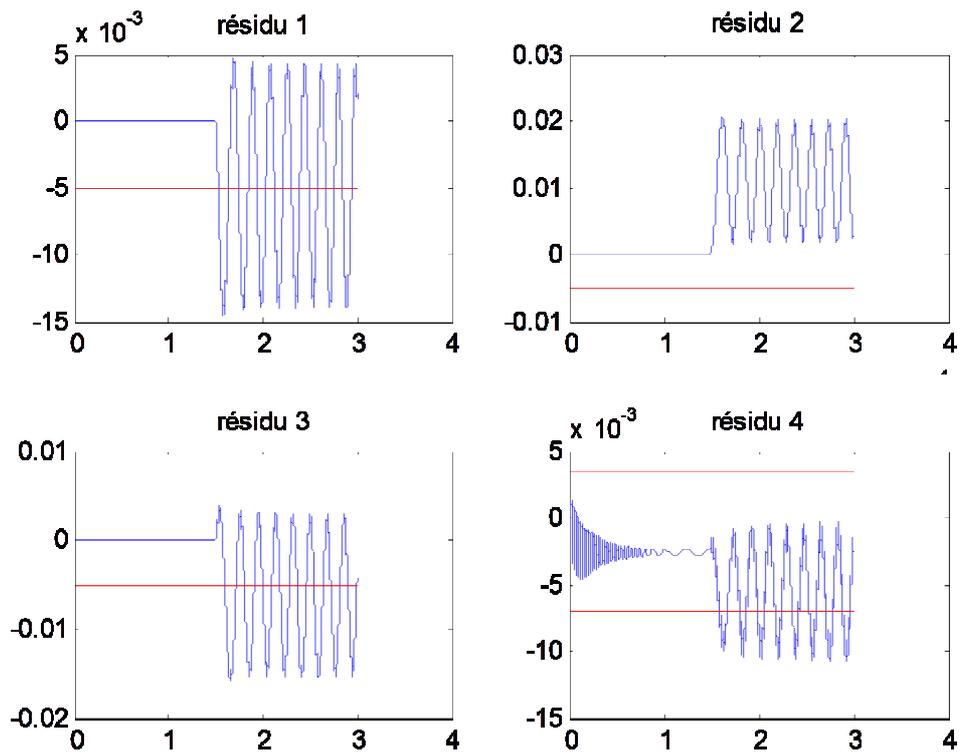


Fig.4.19. Résidus en présence d'un défaut statorique sur la phase 2

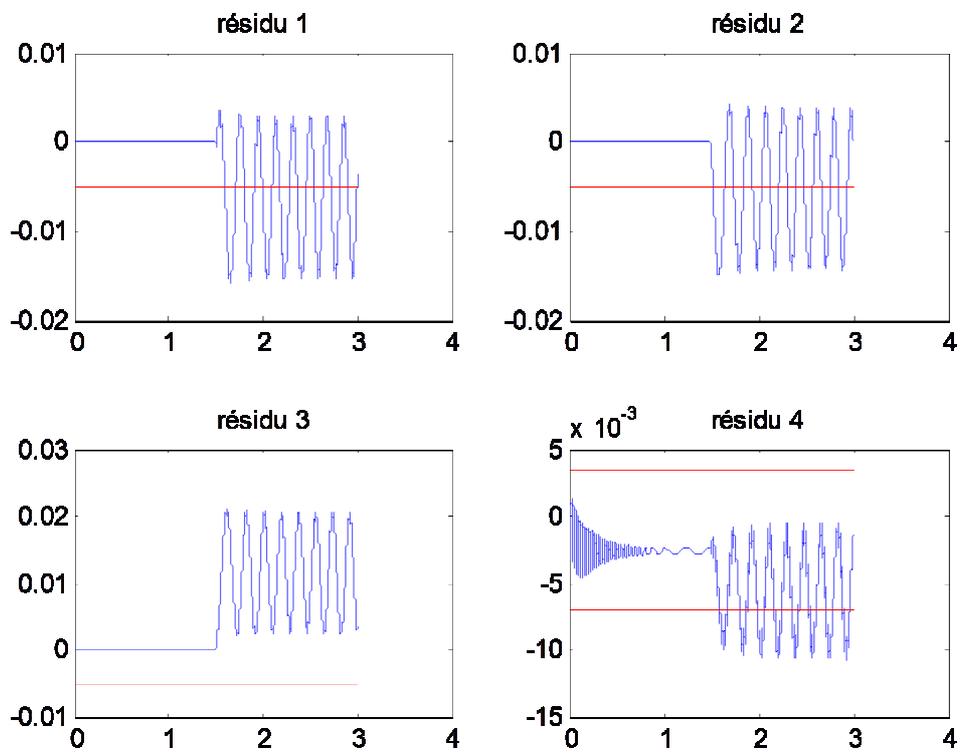


Fig.4.20. Résidus en présence d'un défaut statorique sur la phase 3

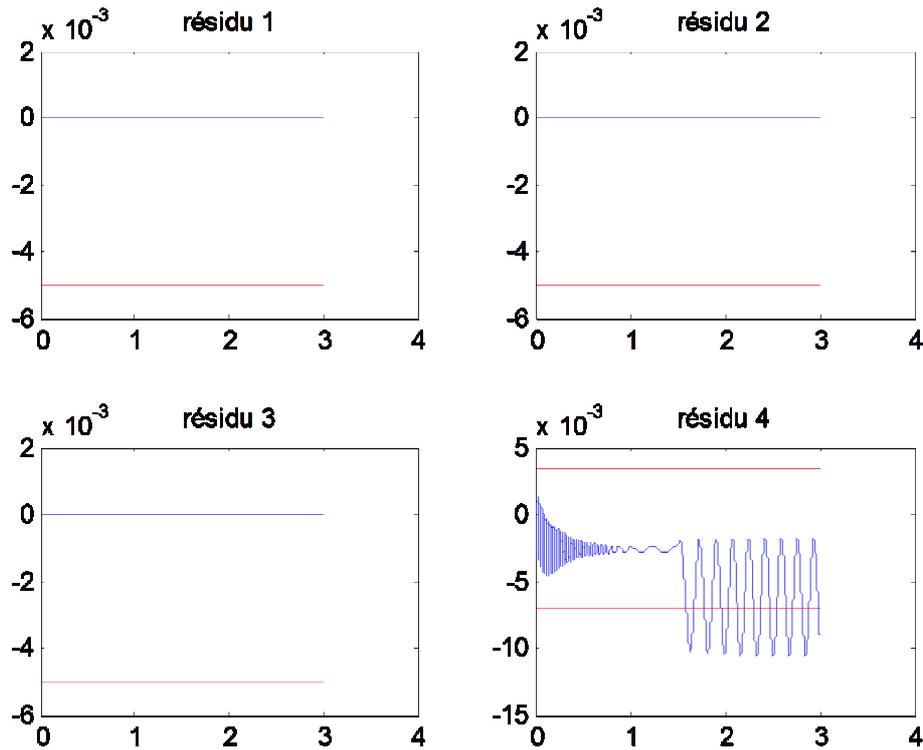


Fig.4.21. Résidus en présence d'un défaut rotorique

- La figure Fig.4.15 montre que les résidus ont une valeur moyenne sensiblement nulle en absence de défauts et de perturbations.
- La figure Fig.4.16 montre que les résidus sont insensibles aux perturbations
- Les figures Fig.4.17, Fig.4.118, Fig.4.19 et Fig.4.20 représentent les différentes configurations des résidus en cas de défaut. La table des signatures suivantes illustre ces configurations :

	r1	r2	r3	r4
Stator phase 1	0	1	1	1
Stator phase 2	1	0	1	1
Stator phase 3	1	1	0	1
Rotor	0	0	0	1

Tab.4.2 Table des signatures (Filtre de Kalman étendu)

On remarque que le passage entre deux configurations de cette table nécessite au moins deux changements donc la table est fortement localisante. [13]

## IV.6 Comparaison entre les deux approches

Deux types d'observateurs ont été utilisés pour la détection et localisation des défauts de la machine asynchrone. Le premier est l'observateur par modes glissants et l'autre est le filtre de Kalman. Ces deux approches utilisées ont donné de bons résultats en termes de détection et localisation des défauts.

Les deux observateurs ont été appliqués directement sur le modèle non linéaire de la machine. La détection et la localisation des défauts ont été réalisées par le biais de quatre résidus et des seuils de détection ajustés par expertise afin de détecter les défauts de faible amplitude.

Les résidus utilisés dans les deux cas ont réussi le test de robustesse contre les perturbations.

L'observateur par modes glissants marque l'avantage d'avoir le volume de calcul le moins volumineux (pas d'échantillonnage de  $10^{-3}$ s) par rapport à celui de Kalman (pas d'échantillonnage de  $10^{-4}$ s) ce qui rend son implémentation sur un ordinateur plus facile.

Le filtre de Kalman est le plus rapide en terme de détection (0.05 s pour Kalman et 0.1 s pour modes glissants) et possède l'erreur d'observation la plus petite.

## IV.7 Comparaison avec l'approche utilisant le modèle de Park

La plupart des travaux de diagnostic à base d'observateurs utilisent le modèle triphasé-diphasé de Park en exploitant sa simplicité.

Le travail effectué par [24] utilise un observateur par modes glissants avec le générateur de résidus suivant :

$$\begin{cases} \dot{z} = -Nz - N^2T\hat{X} - NTA(\hat{X}, U) \\ \hat{r} = z + NT\hat{X} \end{cases} \quad (4.15)$$

Et la modélisation des défauts suivante :

$$\begin{cases} \dot{X} = A(X, U) + E_d(X)d + E_f(X)f \\ Y = CX \end{cases} \quad (4.16)$$

Ou  $E_d(X)$  et  $E_f(X)$  sont des distributions vectorielles déterminés en effectuant un développement de Taylor de  $A(X, U)$  autour des valeurs nominales de paramètres considérés telles que :

$$E_d(X) = \frac{\partial A(X, U)}{\partial d} \Big|_{C_{r0} f_{r0} J_0} \quad E_f(X) = \frac{\partial A(X, U)}{\partial f} \Big|_{R_{s0} L_{s0} R_{r0} L_{r0}}$$

$f$  le vecteur défaut

$d$  le vecteur perturbation

Le générateur de résidus a permis d'avoir les table des signatures suivante :

Défauts Résidus	Variations des grandeurs statoriques	Variations des grandeurs rotoriques	Perturbations $d$
$r_1$	0	1	0
$r_2$	0	1	0
$r_3$	0	1	0
$r_4$	0	1	0
$r_5$	1	1	0

Tab.4.3 Table des signatures : Observateur par modes glissants (modèle de Park)

Le modèle utilisé est moins complexe et possède une non linéarité plus faible que celle du triphasé ce qui facilite la synthèse de l'observateur et réduit le volume de calcul. Néanmoins, l'approche adoptée par [24 ] possède plusieurs inconvénients :

- Le modèle de Park ne prend pas en compte le déséquilibre de l'alimentation et l'utilisation de quatre paramètres seulement ne permet pas de localiser les défauts dans certains cas .
- Les défauts de la machine asynchrone sont des défauts systèmes (composants).  
Donc pour simuler les défauts , il faut les modéliser (exemple : court-circuit statorique : ajout d'un courant de court-circuit au courant statorique et une composante de flux tourne dans le sens inverse du champs tournant ) ou bien trouver les variations paramétriques qui donnent ses symptômes.

La modélisation des défauts par linéarisation autour des valeurs nominales des paramètres n'est pas adéquate dans le cas de la machine asynchrone.

- Cinq résidus sont utilisés pour isoler seulement deux défauts
- On ne peut pas connaître la phase statorique affecté par le défaut (représentation diphasée).

Le modèle triphasé permet d'avoir une représentation réelle de la machine (prendre en compte le déséquilibre de l'alimentation ) et avec les développement des calculateurs numériques sa complexité n'est plus un problème.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude d'observabilité du modèle réduit non linéaire de la machine. Ensuite, nous avons synthétisé deux observateurs non linéaires : observateur par modes glissants et le filtre de Kalman dédiés au diagnostic de la machine asynchrone. Quatre résidus ont été utilisés avec des seuils de détection et des tables de signatures afin de détecter et localiser les différents défauts.

Une comparaison entre les deux approches a donné l'avantage à l'observateur par modes glissants en volume de calcul et au filtre de Kalman en termes de rapidité et précision. Finalement, Une autre comparaison entre l'approche adoptée dans ce travail et une autre utilisant la modélisation sur deux axes a montré l'efficacité de la première.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

L'intérêt croissant des industriels dans le diagnostic des entraînements électriques, justifie l'accent mis par la recherche sur la surveillance des défauts des machines électriques, notamment, les machines asynchrones. L'élaboration des techniques de modélisation des défauts est devenue indispensable, en vue de l'étude de l'impact des défauts et la recherche des signatures significatives.

Notre travail consiste à synthétiser deux observateurs, un par modes glissants et l'autre le filtre de Kalman avec une structure des résidus robuste et localisante pour détecter et localiser les différents défauts de la machine asynchrone.

Nous avons commencé par aborder les différentes méthodes et les critères demandés dans un système de diagnostic. Ces méthodes se répartissent en deux grandes classes selon que l'on dispose ou non d'un modèle mathématique du processus à surveiller. Le système de diagnostic doit être en mesure de réaliser les trois étapes essentielles suivantes : la détection d'un défaut, la localisation du défaut et la prise de décision pour un retour à la normale.

La constitution de la machine asynchrone avec ces deux types : à rotor bobiné et à cage d'écureuil et les différents défauts qui peuvent apparaître sur ces organes sont illustrés dans le deuxième chapitre.

La modélisation de la machine asynchrone n'est pas à négliger pour un bon diagnostic. donc elle a fait l'objet du troisième chapitre avec la discrimination des défauts. Une analyse spectrale est utilisée pour valider le choix de cette discrimination.

La dernière partie de ce travail a été consacrée à la synthèse des deux observateurs et l'application sur la machine. Nous avons présenté en premier lieu les types des observateurs utilisés en diagnostic et le problème de génération des résidus. Les résultats de simulation, les tables des signatures, la comparaison entre les deux méthodes et la comparaison entre l'approche utilisant le modèle triphasé et celle de Park sont élaborés dans ce même chapitre.

En conclusion nous pouvons dire que cette méthode à base d'observateurs s'avère efficace pour la détection et la localisation des défauts engendrant des variations des grandeurs statoriques et rotoriques avec des avantages pour chaque observateur sur un autre. En plus, l'utilisation du modèle triphasé-triphasé qui ne masque aucun élément de la machine a permis de localiser la phase où se situe le défaut et quelque soit le régime de l'alimentation.

Nous proposons comme perspectives l'amélioration de résidus d'isolation avec le remplacement des seuils de détection fixes par d'autres utilisant l'intelligence artificielle ou par des seuils adaptatifs pour réduire les fausses alarmes et les problèmes de non détection.

L'implémentation matérielle de la méthode proposée et sa vérification expérimentale constitue une extension importante qui pourra être apporté à ce travail . L'étude des observateurs après discrétisation donne un bon complément à la méthode employée. Une approche analogue pour la prise en compte des défauts mécaniques et magnétiques est une autre perspective d'ouverture.

La combinaison de la méthode à base d'observateurs et les méthodes de l'intelligence artificielle constituera une solution globale au problème de diagnostic en ligne de la machine asynchrone. L'élaboration d'un système de diagnostic aussi performant donne l'occasion de l'appliquer en industrie.

# **BIBLIOGRAPHIE**

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Amina Nesrine ALLALOU, 'Diagnostic de défauts par observateurs non linéaires : Application aux procédés chimiques ', Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2006.
- [2] Wafa BENZAOUI, 'Diagnostic de la machine asynchrone à base d'observateurs', Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale polytechnique, 2007.
- [3] Tarek BOUMEGOURA, 'Recherche de signature électromagnétique d'une machine asynchrone et synthèse d'observateur en vue de diagnostic', Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2001
- [4] Carlos CANUDAS de Wit, 'Commande des machines asynchrones 2 : Optimisation, discrétisation et observateurs', HERMES Science Europe, Paris, 2000.
- [5] Roland CASIMIR, 'Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes', Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2003.
- [6] Jin CHANGXI, 'Sliding mode control and estimation of induction motors', Thesis for the degree Master of Science, The Ohio state university, 1997.
- [7] Adnan DERDIYOK, Zhang YAN, Mustafa GUVEN, Vadim UTKIN, ' A sliding mode speed and rotor time constant observer for induction machines', The 27<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON'01,IEEE,2001.
- [8] Gaëtan DIDIER, Hubert RAZIK, 'Sur la détection d'un défaut au rotor des moteurs asynchrones', Revue 3EI Numéro 27 de décembre 2001
- [9] Gaëtan DIDIER, 'Modélisation de la machine asynchrone en présence de défaillances', Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré de Nancy, 2004.

- [10] Abdelaziz FERDJOUNI, 'Diagnostic des défauts à l'aide d'observateurs Application à la machine asynchrone', Thèse de doctorat d'état, Université Saad Dahlab, Blida, 2007.
- [11] Michael FILIPPICH, 'Digital control of three phase induction motor', Thesis for the degree of electrical engineering, The university of Queensland, 2002
- [12] Fiorenzo FILLIPETTI, Giovani FRANCESCHINI, Carla TASSONI, Peter VAS, 'Recent Developpement of Induction Motor Drives Fault Diagnosis Using AI Techniques', IEEE Transactions on industrial electronics VOL 47 NO 5 October 2000.
- [13] Ahmed HAFIFA, Ferhat LAAOUAD, Kouider LAROUSSE, 'Utilisation de la méthode FDI pour la localisation de défauts de fonctionnement d'un processus non linéaire', 4<sup>th</sup> International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007, Novembre 2007.
- [14] K.HAKIKI, B.MAZARI, A.LIAZID, S.DJABER, 'Fault reconstruction using sliding mode observers', American journal of applied sciences 1669-1674, 2006
- [15] Mounir HAIDOUR, Nassim HAZIANE,'Diagnostic de la machine asynchrone : approche multimodèle ', Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique,2005.
- [16] Ibrahim HASKARA, 'Sliding mode controllers and observers', Thesis for the degree Master of Science, The Ohio state university, 1996.
- [17] Gerhard HENNEBERGER, 'Elictrical Machines 1', Lectures, Aachen University, Germany.
- [18] Sihem KECHIDA, Fairouz SALHI, Saida HASSAINIA, Rachida Hadiby GHOU, 'Supervision des systèmes incertains', 3<sup>th</sup> International Conference : Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, Tunisie, 2005.
- [19] A.F.KHATIR, K.E.HEMSAS, 'Diagnostic des machines asynchronies: Utilisation du modèle multi enroulements', 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007, 2007.

[20] Alan MILETIC, Mirko CETTOLO, 'Frequency converter influence on induction motor rotor faults detection using motor current signature analysis – Experimental Research', SDEMPED 2003- Symposium on Diagnostics of Electric Machines, Power Electronics and Drives, Atlanta USA, 24-26 August 2003, 0-7803-7838-5 IEEE.

[21] Franck MORAND, 'Techniques d'observation sans capteur de vitesse en vue de la commande des machines asynchrones', Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, .2005.

[22] Olivier ONDEL, 'Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur-machine asynchrone', Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2006.

[23] Juha PYRHONEN, Tapani JOKINEN, Valéria HARBOVCOVA, 'Design of Rotating Electrical Machines', John Wiley and Sons, Ltd, ISBN 978-0-470-69516-6, Finland, 2008.

[24] Taous Meriem LALEG, 'Contribution aux Méthodes de Diagnostic à Base d'Observateurs et à la Commande Tolérante aux Défauts Application à la Machine Asynchrone et au Robot SCARA', Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique, 2004.

[25] Hubert RAZIK, Gaëtan DIDIER, 'Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone', Groupe de recherche en électrotechnique et électronique de Nancy, Université Henri Poincaré Nancy 1, 2003.

[26] Mickael RODRIGUES, 'Diagnostic et commande active tolérante aux défauts appliqués aux systèmes décrits par des multi-modèles linéaires', Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy 1, 2005.

[27] Frédéric ROTELLA, 'Filtrage Optimal', Notes de cours, Ecole des ingénieurs de Tarbes

[28] Emmanuel SCHAEFFER, 'Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts', Thèse de doctorat, Université de Nantes, 1999.

- [29] Jochen SCHRODER, 'Diagnosis and Fault Tolerant Control', 2<sup>nd</sup> edition, Springer, IISBN 978-3-540-35652-3, New York, 2006
- [30] B.TABBACHE, N.HENINI, A.KHELOUI, 'Observation of flow and speed by an extended Kalman filter for direct torque control of EV induction motor', 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007, 2007.
- [31] Andrzej M. TRZYNADLOWSKI, 'Control of Induction Motors', Academic Press, ISBN 0-12-701510-8, Nevada, USA, 2001.
- [32] Qing WU, 'Fault diagnosis in nonlinear systems using learning and sliding mode approaches with applications for satellite control systems', Simon Fraser University, 2008
- [33] Yi XIONG, Mehrdad SAIF, 'Robust and nonlinear fault diagnosis using sliding mode observers', Proceedings of the 40<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, Florida USA, 0-7803-7061-9/01, 2001
- [34] Wen YU, 'Sliding mode technique and sliding mode observer', Control Automatico, CINVESTAV-IPN, 2003
- [35] Yan ZHANG, 'Control and observation for electric machines by sliding modes', Dissertation for the degree Doctor of Philosophy, The Ohio state university, 2002.

# **ANNEXES**

## ANNEXE A

### Paramètres de la machine asynchrone :

Les simulations ont été effectuées sur une machine définie par les paramètres suivants :

Puissance nominale : 5.5 kW

Tension nominale : 220/380 V

Vitesse nominale : 285 rd/s

Fréquence nominale : 50Hz

Résistance rotorique (  $R_r$  ) : 2.756 W

Résistance statorique (  $R_s$  ) : 2.86 W

Inductance principale statorique (  $L_s$  ) : 0.397 H

Inductance principale rotorique (  $L_r$  ) : 0.397 H

Inductance de fuite statorique (  $L_{sf}$  ) : 0.009594 H

Inductance de fuite rotorique (  $L_{rf}$  ) : 0.009594 H

Inductance mutuelle stator-rotor (  $L_m$  ) : 0.3953 H

Nombre de paires de pôles (  $p$  ) : 1

Moment d'inertie (  $J$  ) : 0.023976 Kg.m<sup>2</sup>

Coefficient de frottement (  $f$  ) : 0.0014439 Kg.m<sup>2</sup> /s

Couple de charge nominale : 10 N.m

## ANNEXE B

L'observateur en modes glissants est donné par :

$$\dot{[\hat{I}]} = [L]^{-1}([V] - ([R] + [G]\omega)[\hat{I}]) + K * Si$$

Avec

**K** gain de l'observateur

$$Si^T = [ \text{sign}(I_{sa} - \hat{I}_{sa}) \quad \text{sign}(I_{sb} - \hat{I}_{sb}) \quad \text{sign}(I_{sc} - \hat{I}_{sc}) ]$$

La surface de glissement  $S = (I_s - \hat{I}_s)$  vérifie les deux conditions

- $S = 0$  condition d'invariance
- $S \cdot \dot{S} < 0$  condition d'attractivité

Le gain **K** est déterminé d'une manière à assurer la condition d'attractivité de la surface et la convergence de l'erreur de l'observation vers zéro  $\dot{E} = 0$  ( $E = I - \hat{I}$ ).

A cause de la complexité du système, le gain **K** a été déterminé après plusieurs essais pour des raisons d'optimisation par la relation suivante :

$$K = G \cdot \omega \cdot N$$

Avec **N** est une matrice de dimension  $3 \times 6$  définie comme suit :

$$N = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Et l'observateur deviendra :

$$\dot{[\hat{I}]} = [L]^{-1}([V] - ([R] + [G]\omega)[\hat{I}]) + [G]\omega[N] * Si$$

Les figures suivantes illustrent le comportement de l'observateur dans le cas des défauts :

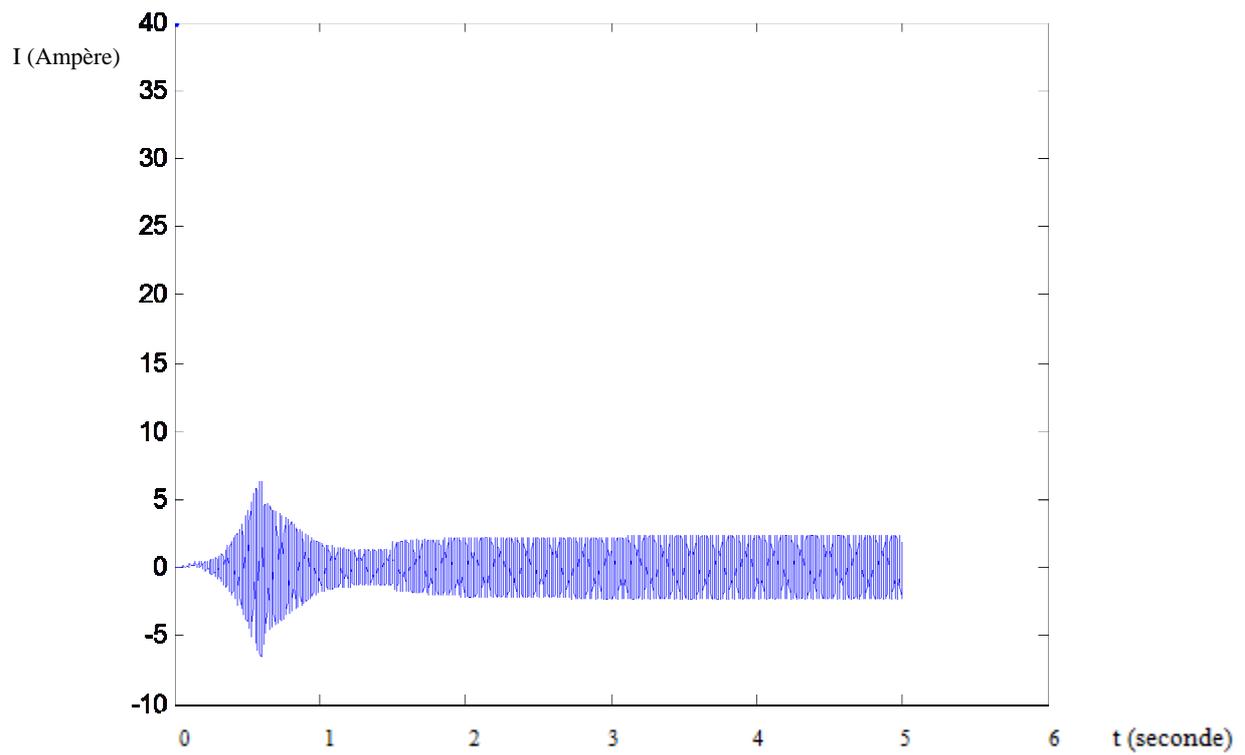


Fig.B.1 Erreur d'observation : Défaut statorique

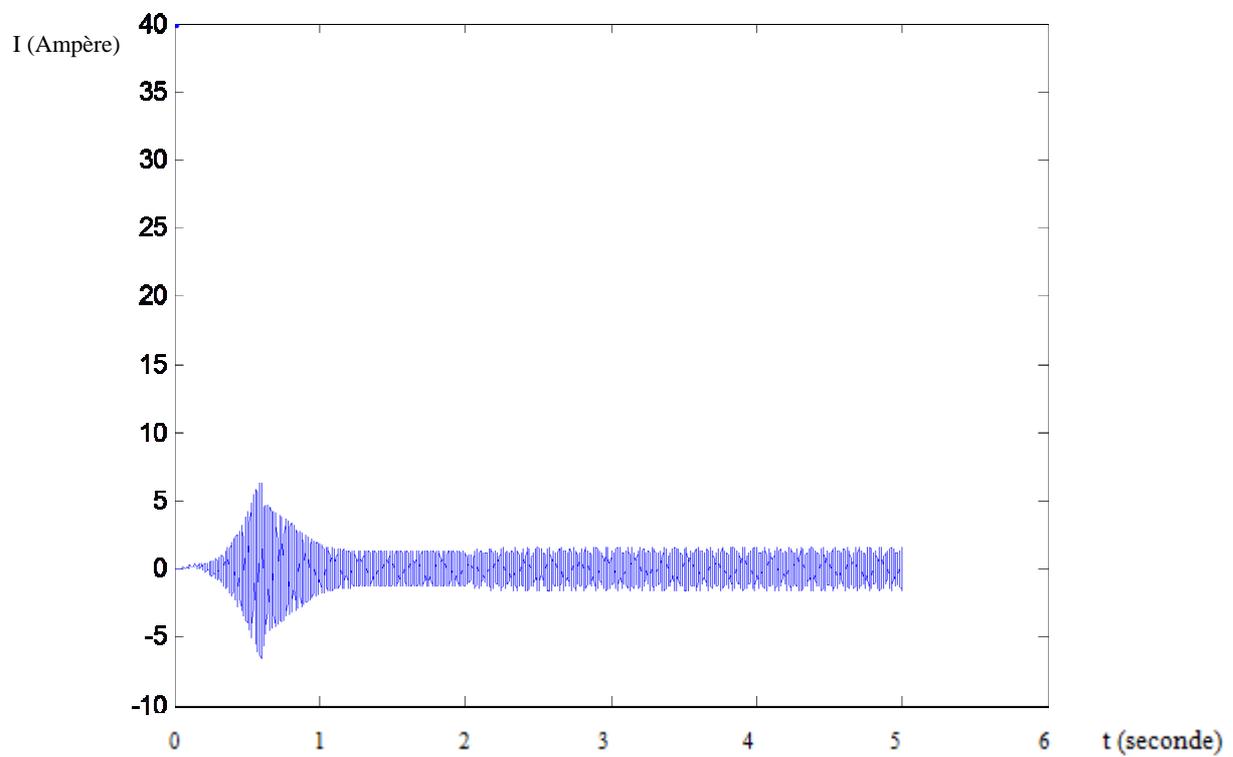


Fig.B.2 Erreur d'observation: Défaut rotorique

## ANNEXE C

Le filtre de Kalman pour un système non linéaire est donné par :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) - R \left( \frac{\partial h(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \right)^T (h(\hat{x}) - y) \\ \dot{R} = Q + \left( \frac{\partial f(\hat{x}, u)}{\partial \hat{x}} \right) R + R \left( \frac{\partial f(\hat{x}, u)}{\partial \hat{x}} \right)^T - R \left( \frac{\partial h(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \right)^T \left( \frac{\partial h(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \right) R \end{cases}$$

Dans notre cas, on a :

$$f(\hat{x}, u) = [L]^{-1}([V] - ([R] + [G]\omega)[\hat{I}])$$

$$y^T = [I_{sa} \ I_{sb} \ I_{sc}]$$

$$h(\hat{x})^T = [\hat{I}_{sa} \ \hat{I}_{sb} \ \hat{I}_{sc}]$$

$$R_0 = \begin{pmatrix} 1000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1000 \end{pmatrix}$$

$$Q = \begin{pmatrix} 20000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 20000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 20000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 20000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20000 \end{pmatrix}$$

Les figures suivantes illustrent le comportement du filtre en cas des défauts :

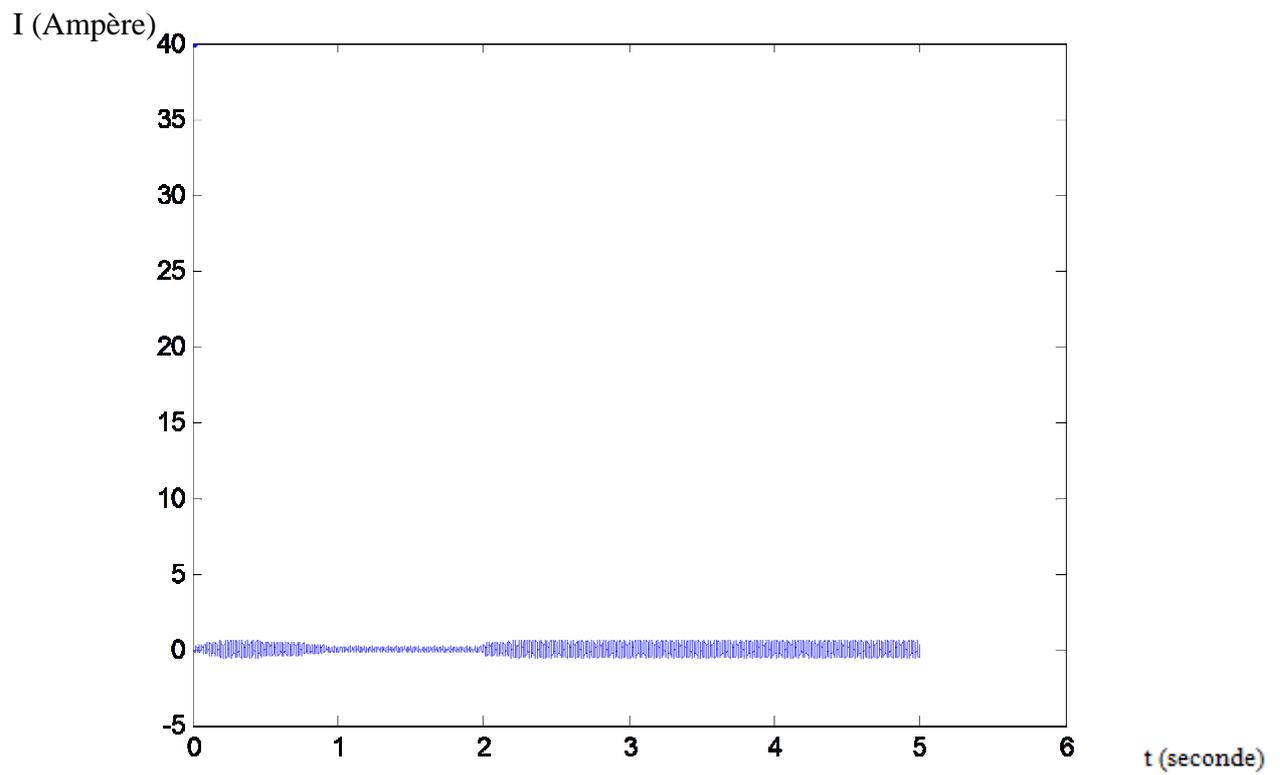


Fig.C.1 Erreur d'observation: Défaut statorique

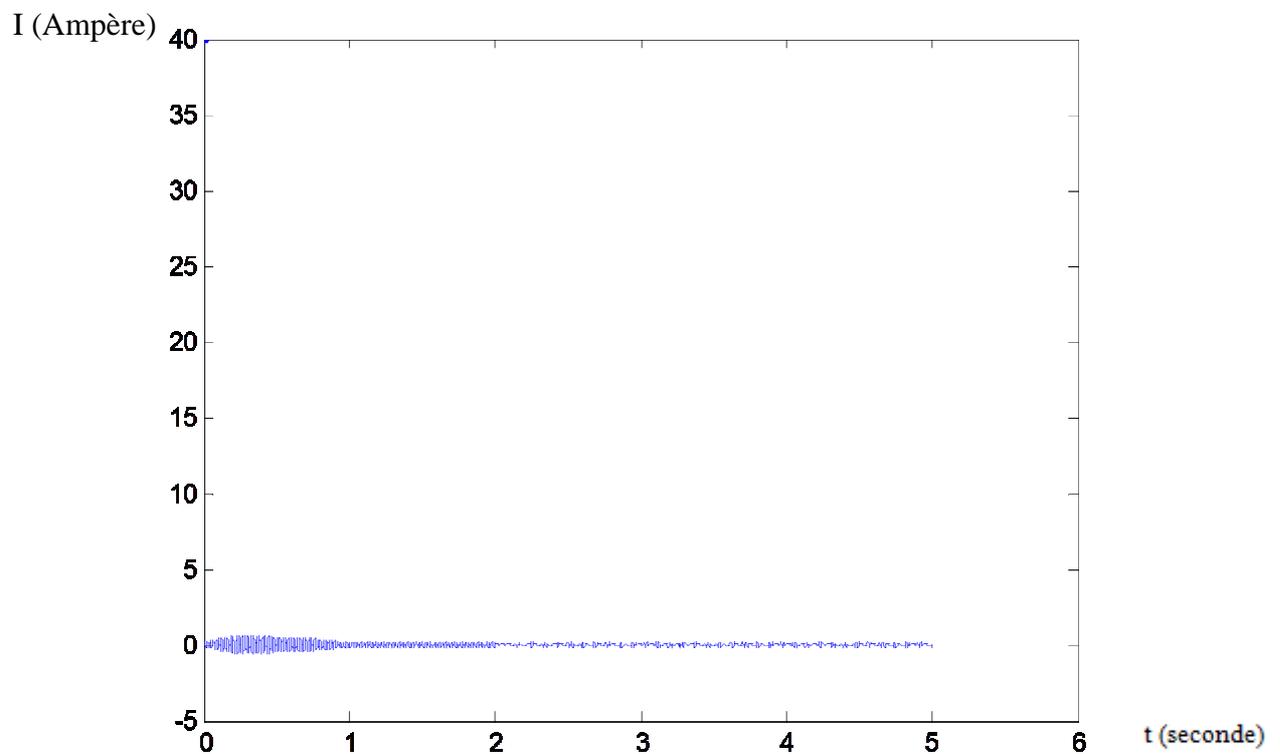


Fig.C.2 Erreur d'observation: Défaut rotorique

## ملخص

التدوير الكهربائي يستعمل أكثر فأكثر الآلات اللامتزامنة ثلاثية الأطوار، فمن الضروري كشف الأعطاب التي يمكن أن تظهر فيها و عليه كان ضروريا تطوير طرق المراقبة. نهتم في هذا العمل بتشخيص الأعطاب باستعمال المراقبات في المحرك اللامتزامن ذي القفص السنجابي. قمنا باستعمال نوعين من المراقبات: المراقب في وضع الانزلاق ومصفاة Kalman مع أربع إشارات كاشفات للخلل من أجل كشف وتحديد الأعطاب على مستوى الدوار و الساكن.

**كلمات مفتاحية:** تشخيص, المحرك اللامتزامن, عطب, مراقب في وضع الانزلاق, مصفاة Kalman

## Résumé

Les entraînements électriques utilisent plus en plus les machines asynchrones. Il est important de détecter les défauts qui peuvent apparaître dans ces machines et donc de développer des méthodes de surveillance de fonctionnement. Nous nous intéressons dans ce travail au diagnostic des défauts à base d'observateurs de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Deux observateurs sont proposés; l'observateur par modes glissants et le filtre de Kalman avec des résidus directionnels pour détecter et localiser les défauts au niveau du rotor et du stator.

**Mots clés :** Diagnostic, Machine asynchrone, Défaut, Observateur par modes glissants, Filtre de Kalman

## Abstract

Electrical tractions use more and more the asynchronous machines. It is important to early detect the faults likely to appear in those motors and therefore to implement a preventive maintenance. In this work, we are interested by squirrel cage Induction machine faults diagnosis using observers. Two observers are used; sliding mode observer and Kalman filter with directional residues in purpose to detect stator and rotor fault.

**Key words :** Diagnosis, Induction machine, Fault, Sliding mode observer, Kalman filter