



**HAL**  
open science

# Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic

Abdelghani Chahmi

► **To cite this version:**

Abdelghani Chahmi. Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic .  
Energie électrique. université des sciences et technologie d'Oran -MB 2017. Français. NNT: .  
tel-01658902

**HAL Id: tel-01658902**

**<https://hal.science/tel-01658902>**

Submitted on 8 Dec 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THÈSE

## En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences

*Présentée par : CHAHMI Abdelghani*

### *Intitulé*

Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic

*Faculté* : *Génie Electrique*  
*Département* : *Electrotechnique*  
*Spécialité* : *Electrotechnique*  
*Option* : *Machines électriques*

*Devant le Jury Composé de :*

<i>Membres de Jury</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Domiciliation</i>
<i>RAHLI Mustapha</i>	<i>Prof</i>	<i>Président</i>	<i>USTO-MB</i>
<i>BENDJEBBAR Mokhtar</i>	<i>Doct</i>	<i>Encadreur</i>	<i>USTO-MB</i>
<i>OULD BOUAMAMA Belkacem</i>	<i>Prof</i>	<i>Examineur</i>	<i>Ecole Polytechnique de Lille</i>
<i>ZERIKAT Mokhtar</i>	<i>Prof</i>	<i>Examineur</i>	<i>ENP - Oran</i>
<i>ZEMALACHE MEGUENNI Kadda</i>	<i>Prof</i>	<i>Examineur</i>	<i>USTO-MB</i>
<i>ZAQUI Abdelhalim</i>	<i>Doct</i>	<i>Examineur</i>	<i>EMP – Bordj El Bahri</i>

26/02/2017

Année Universitaire : 2016-2017

A ma mère

A mon père

" Et par miséricorde, abaisse pour  
eux l'aile de l'humilité, et dis : ô mon  
Seigneur, fais-leur, à tous deux, miséricorde  
comme ils m'ont élevé tout petit."

Le noble Coran, S17/V24

A mes frères et ma sœur

## Avant- propos

---

Le travail présenté dans cette thèse s'est déroulé au sein de l'équipe contrôle et diagnostic des entraînements électriques du laboratoire de développement des entraînements électrique (LDEE) et au sein de l'équipe Système et réseau électrique (Syrel) du laboratoire de génie électrique de Grenoble (G2Elab). Ce travail s'inscrit dans une démarche plus vaste visant à intégrer de plus larges échelles la surveillance des systèmes à base de machine asynchrone.

Tous d'abord, je tiens à exprimer mes vifs remerciements à M. Mokhtar Bendjebbar, Maître de conférence (A) à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, pour avoir dirigé cette thèse, je ne peux que vous dire un énorme merci pour tout : la science, les conseils, l'humanité, les discussions enrichissantes que nous avons portées au long des cinq années de thèse, le support moral et enfin d'avoir accepté de m'encadrer dès le premier contact. M. Belkacem Ould Bouamama, Professeur des universités à l'universités Lille1 de Lille, je vous dis « grand merci » pour tous les encouragements, les discussions scientifiques et autres.

J'exprime ma profonde gratitude à M. Rahli Mustapha, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, pour avoir accepté la présidence du jury.

Mes sincères remerciements s'adressent également à M. Mokhtar Zerikat, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, à Monsieur Kadda Meguenni Zemalache, professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran et à M. Abdelhalim Zaoui, Maître de Conférence (A) à l'Ecole Militaire Polytechnique Bordj El-Bahri –Alger pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de participer à ce jury. J'apprécie vos remarques pertinentes et vos questions qui ont montrés votre intérêt au sujet. Je tiens à noter que vos commentaires m'ont aidé à prendre davantage de recul sur le travail accompli. Merci encore une fois pour vos investissements en temps en jugeant le travail et en étant présent à la soutenance.

Pour la prunelle de mes yeux, mes enfants, Ouarda et Abdelhadi, vos beaux sourires m'ont donné l'énergie de continuer. Vous m'avez toujours demandé `` Papa, tu peux jouer avec nous ?`` et ma réponse était « Ouuuuuuuuuu ».

A ma femme Hanane, sans que rien ne serait possible, la seule personne qui a partagé avec moi les moments d'inquiétudes avant ceux de joie, pendant ces cinq années de thèse. Son soutien et ses mots m'ont toujours aidé à dépasser les moments difficiles. Il n'y pas de mots suffisamment forts pour lui exprimer ma gratitude. Je la remercie énormément pour la compréhension, la patience et l'amour dont elle a fait preuve durant ces années. Je me dois donc de lui dédier personnellement ce travail.

## Avant- propos

---

J'en arrive à mes derniers mots qui sont ceux révélant mes plus profonds remerciements. Elles sont adressées à mes responsables et en premier Mr. Mohamed Larbi Haouli pour la confiance qu'il m'a accordé pour poursuivre mes études et pour l'intérêt qui porte à la formation et à la recherche, Mr Hamid Chabane, pour ses encouragements et sa confiance. Je remercie aussi toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin pour la réussite de mon travail.

**Abdelghani CHAHMI**

Le 20 avril 2016

## تمهيد

هذا العمل هو جزء من موضوع كشف وتحديد الاعطال في محركات الكهربية وعلى وجه الخصوص تلك التي تقوم على آلة غير متزامن. وبرر اختيار الجهاز عن طريق النجاح المتزايد ولدها، وخصوصا في محركات متغيرة السرعة الكهربية.

وتستخدم المحركات الكهربية غير المتزامن آلة تستند على نطاق واسع في التطبيقات الصناعية بسبب التكلفة المنخفضة، وأدائهم ومثابته.

تركز مساهمتنا في رصد وتشخيص الاعطال في اجهزة الحث مثل العيوب واضعة، عيوب كسر القضبان الدوار وتحمل العيوب. في هذا السياق، اقترحنا النهجين الكشف عن خطأ من خلال رصد الثابت الحالي في هذه الحالة إشارة النهج ونهج النظام النهج إشارة، لأنه يقوم على معالجة وتحليل الوقت أو تردد الإشارة الموالي الحالية.

نهج نموذج، استنادا إلى مراقب الدولة الموسعة. يتم تطبيق النموذج الخطي بناء على المرشحات واسعة للتشخيص.

**كلمات البحث :** التعريفي المحركات والرصد والتشخيص، والعيوب، كالمان مرشح

## ***RESUME***

Ce travail s'inscrit dans la thématique de la détection et localisation de défauts dans les entraînements électriques et en particulier ceux à base de machine asynchrone. Le choix de la machine est justifié par le succès grandissant qu'elle a suscité, notamment, dans les entraînements électriques à vitesse variable.

Les entraînements électriques à base de machine asynchrone sont largement utilisés dans les applications industrielles en raison de leurs faibles couts, de leurs performances et de leurs robustesses.

Notre contribution s'intéresse à la surveillance et au diagnostic des défauts dans la machine asynchrone tels que les défauts de roulements, les défauts de rupture de barres rotoriques et les défauts de roulements. Dans ce contexte, nous avons proposé deux approches de détection de défaut par la surveillance du courant statorique en l'occurrence l'approche signal et l'approche système.

L'approche signal, elle se base sur le traitement et l'analyse du signal temporel ou fréquentiel du courant statorique.

L'approche modèle, qui repose sur les l'observateurs d'état étendu. Des filtres étendus à base de modèle linéaires sont appliqués pour le diagnostic.

**Mots clés :** Machine asynchrone, surveillance et diagnostic, défauts, filtre de Kalman

## ***ABSTRACT***

This work falls within the scope of detection and localization of defects in electrical drives and in particular those based on asynchronous machines. The choice of the machine is justified by the growing success that it has generated, in particular, in variable speed electric drives.

Asynchronous machine-based electrical drives are widely used in industrial applications because of their low cost, performance and robustness.

Our contribution focuses on the monitoring and diagnosis of defects in the asynchronous machine such as bearing defects, rotor bar failure defects and bearing defects. In this context, we proposed two approaches for fault detection by monitoring the stator current, in this case the signal approach and the system approach.

The signal approach is based on the processing and analysis of the temporal or frequency signal of the stator current.

The model approach, which relies on the extended state observers. Extended filters based on linear models are applied for diagnosis.

**Keywords:** Asynchronous induction, monitoring and diagnosis, defects, Kalman filter

## **Articles en conférences nationales:**

1. **A.Chahmi**, M.Bendjebbar, B. Raison « Détection des défauts sur un entraînement électrique par analyse fréquentielle des courants statoriques » *1ère Conférence Internationale sur l'automation appliquée et les diagnostics industriels*, ICAAID 29-30 mars 2015- Djelfa - Algérie.

2. **A.Chahmi**, M.Bendjebbar, K.Nounou « Détection des défauts dans une machine asynchrone par analyse fréquentielle des courants statoriques » *9ème Conférence sur le Génie Electrique, CGE'09*, 14-15 Avril 2015- Ecole Militaire Polyethnique Bordj-El-Bahri-Alger - Algérie.

## **Articles en conférences internationales :**

1. **A.Chahmi**, « Analyse fréquentielle des défaillances d'une machine asynchrone » *JCGE'2014-SEEDS Journées Jeune Chercheur en Génie Electrique* 4-5 juin 2014 Saint-Louis – France.

2. **A.Chahmi**, M. Bendjebbar, B. Raison « Détection de défaillance sur un entraînement électrique – Approche Signal » *CISTEM'2014 Premier Conférence Internationale en Sciences Technologies Electriques au Maghreb* 12-14 novembre 2014-Tunis-Tunisie. DOI: 10.1109/CISTEM.2014.7076938. Publication Year: 2014, Page(s): 1 – 6. *IEEE Conference Publication*.

3. **A.Chahmi**, « Analyse spectrale des défauts rotoriques sur un entraînement électrique par les vecteurs de Park » *JCGE'2015-SEEDS Journées Jeune Chercheur en Génie Electrique* 10-11 juin 2015- Cherbourg – France.

## **Article en revue internationale :**

1. **A.Chahmi**, M.Bendjebbar, B.Raison, M.Benbouzid “An Extender Kalman Filter-Based Induction Machines Faults Detection” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, ISSN: 2088-8708, V6 (2) April 2016.

## Notations

Nom	Symbole	Unité
Puissance active	$P$	W
Courant statorique de la phase a	$isa$	A
Le flux à travers un enroulement statorique	$\varphi sa$	Wb
Résistance statorique	$R_s$	$\Omega$
Tension statorique de la phase a	$V_{sa}$	V
Coefficient d'inductance propre d'un enroulement du stator	$L_s$	H
Coefficient d'inductance mutuelle entre deux enroulements du stator	$MS$	-
Fréquence d'alimentation	$f$	Hz
Glissement d'une machine asynchrone	$g$	-
Coefficient de torsion	$k$	-
Coefficient d'amortissement	$d$	-
Rapports de réduction	$N1, N2$	-
Pulsation statorique	$w_s$	-
Moment d'inertie de la machine	$J1, j2$	-
Couple électromagnétique	$C_{em}$	N.m
Indice pour les trois phases du stator et rotor	$a, b, c$	-
Nombre de spire rotorique	$N$	-
Nombre de spire statorique	$N$	-
Vitesse de rotation du rotor	$w_r$	Tr/min
Amplitude de signal	$A$	dB
temps de défaut	$t$	S
Axe biphasés de Concordia	$\alpha, \beta$	-
Axe biphasés de Park	$d, q$	-
Rapport de réduction	$n_{red}$	-
Diamètre de la bille de roulement	$BD$	-
Angle de contact des billes	$\beta$	-
Diamètre moyen ou diamètre de la cage	$PD$	-
Fréquence de défaut de bague intérieure du roulement	$f_i$	Hz
Matrice des résistances statoriques	$[R_s]$	-
Fréquence de défaut de bague extérieure du roulement	$f_o$	Hz
Matrice des résistances rotoriques	$[R_r]$	-
Fréquence de défaut sur la bille	$f_b$	Hz
Matrice des inductances statoriques	$[L_s]$	-
Matrice des inductances rotoriques	$[L_r]$	-
Variable X reconstruite (estimée ou observée)	$\hat{X}$	-
Vecteur d'état d'un système	$X$	-
Vecteur de sortie d'un système	$Y$	-
Nombre de billes	$n_b$	-
Couple transmis	$C_t$	-
Vitesse de rotation mécanique	$W_r$	Tr/min
La matrice jacobienne de la fonction non-linéaire	$f$	-
Modulation Largeur d'Impulsion	$MLI$	-
Motor Current Signature Analysis	$MCSA$	-
l'angle qui définit la position du rotor par rapport au stator	$\theta_r$	-
Inductance de fuite d'une barre rotorique	$L_b$	H

## Notations

---

Inductance de fuite d'un segment d'anneau de court-circuit	$L_e$	H
Inductance mutuelle entre l' $i$ ème et la $j$ ème maille rotorique	$L_{rij}$	H

## **Chapitre I: Diagnostic de la machine asynchrone**

Figure I.1	Diagramme des différents concepts de maintenance	5
Figure I.2	Evolution des informations traitées par le système	6
Figure I.3	Eléments de constitution d'une machine asynchrone	10
Figure I.4	Vue schématique en perspective du stator	11
Figure I.5	Vue schématique en perspective du rotor	12
Figure I.6	Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage	14
Figure I.7	Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage	15
Figure I.8	Structure d'un roulement à billes	17
Figure I.9	Types d'excentricité: (a) rotor concentré; (b) excentricité statique; c) excentricité dynamique	22
Figure I.10	Schémas des défauts au niveau de l'onduleur	24
Figure I.11	Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone	25
Figure I.12	Facteurs aggravant le défaut	25
Figure I.13	Répartition des défauts	26
Figure I.14	Répartition des défauts statoriques	26
Figure I.15	Répartition des défauts rotoriques	27

## **Chapitre II: Les méthodes de diagnostic dans la machine asynchrone**

Figure II.1	Transformations de mesures dans un système de diagnostic	32
Figure II.2	Les méthodes de diagnostic	33
Figure II.3	Les différentes méthodes de diagnostic	35
Figure II.4	La structure générale de réseau de neurone	36

### **Chapitre III: Approche signal**

Figure III.1	Schéma de principe de la machine asynchrone	45
Figure III.2	Circuits électriques adoptés pour la modélisation des trois phases	46
Figure III.3	Circuit équivalent d'un rotor à cage sain	49
Figure III.4	Schéma électrique de l'association onduleur / machine asynchrone	52
Figure III.5	Schéma bloc du système simplifié	53
Figure III.6	Le courant, la vitesse de rotation et le couple (machine sain)	55
Figure III.7	Spectre du courant statorique de la phase a	56
Figure III.8	Spectre du courant statorique avec défaut sur une phase au stator	57
Figure III.9	Spectre du courant statorique avec défaut sur une phase au rotor	58
Figure III.10	Spectre du courant statorique de la machine saine avec défaut onduleur et la machine sain	59
Figure III.11	Spectre du courant de la phase a de la machine avec défaut sur le capteur de courant	61
Figure III.12	Représentation schématique du système à surveiller	61
Figure III.13	Vitesse mesurée lors d'un défaut capteur de vitesse	62
Figure III.14	La pulsation stator lors d'un défaut capteur de vitesse	62
Figure III.15	Modèle d'une transmission flexible	63
Figure III.16	Géométrie du roulement à billes	64
Figure III.17	Spectre de la référence de couple pour un défaut sur la bague externe	65
Figure III.18	Spectre de la référence de couple pour un défaut sur la bague interne	65
Figure III.19	Spectre de la référence de couple pour un défaut sur la bille	65

### **Chapitre VI: Approche modèle**

Figure VI.1	Observateur au cœur d'un système de conduit	68
Figure VI.2	Différents types d'observateurs	69

## Liste des figures

---

Figure VI.3	Représentation physique de la transformation de PARK pour une machine Asynchrone	70
Figure VI.4	Courant statorique de la phase a de la machine	79
Figure VI.5	Flux statorique de la machine	79
Figure VI.6	Couple de la machine	80
Figure VI.7	Vitesse de la machine	80
Figure VI.8	Estimation de la résistance rotorique par le filtre de Kalman sans compensation	81
Figure VI.9	Estimation de la résistance rotorique par le filtre de Kalman avec compensation	81
Figure VI.10	Courant statorique de la machine en défaut au rotor	82
Figure VI.11	Résistance rotor estimée lors d'un défaut au rotor	82
Figure VI.12	Courant statorique de la machine en défaut au stator	83
Figure VI.13	FFT du courant statique de la phase	83
Figure VI.14	Courant de la machine de la phase (Isa), courant de l'observateur (Isakal)	84
Figure VI.15	Résistance rotor estimée lors d'un défaut au stator	85
Figure VI.16	Principe de la démodulation	86
Figure VI.17	Résistance rotorique compensée démodulé	87
Figure VI.18	Courant statorique de la machine en défaut d'onduleur	88
Figure VI.19	FFT du courant en basse et haute fréquence	89
Figure VI.20	Résistance rotor estimée de la machine pour un défaut d'onduleur	89

## Table des matières

---

# Table des matières

---

Avant propos

Notations

Introduction générale 1

## Chapitre 1 : Diagnostic de la machine asynchrone

1.1	Introduction .....	3
1.2	Terminologie relative au diagnostic.....	3
1.3	Etude et synthèse bibliographique.....	6
1.4	Formulation du problème.....	7
1.5	Objectifs et contributions souhaités.....	9
1.6	La machine asynchrone.....	9
1.6.1	Constitution de la machine asynchrone.....	10
1.6.1.1	Le stator .....	11
1.6.1.2	Le rotor à cage.....	11
1.6.1.3	Organes mécaniques.....	12
1.7	Principe de fonctionnement de la machine asynchrone.....	13
1.8	Les défaillances dans la machine asynchrone.....	13
1.8.1	Défauts internes et externes.....	14
1.8.2	Défaillance d'ordre mécanique.....	16
1.8.2.1	Défaillances du flasque.....	16
1.8.2.2	Défaillances de l'arbre.....	16
1.8.2.3	Défaillances des roulements mécaniques.....	17
1.8.2.4	Autres défaillances mécaniques.....	18

1.8.3 Défaillances d'autres origines.....	18
1.8.3.1 Défaut de la charge.....	18
1.8.4 Défaillances au stator.....	19
1.8.4.1 Défauts d'isolant dans un enroulement.....	20
1.8.4.2 Un court-circuit entre spires de la même phase.....	20
1.8.4.3 Un court-circuit entre phases.....	20
1.8.4.4 Défaillances de circuit magnétique.....	21
1.8.5 Défaillances au rotor.....	21
1.8.5.1 Excentricité.....	21
1.8.5.2 Rupture de barres et d'anneau de court-circuit.....	23
1.8.6 Les défauts au niveau de l'onduleur.....	23
1.8.6.1 Les schémas des défauts au niveau de l'onduleur.....	24
1.9 Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone.....	24
1.9.1 Défauts statoriques.....	26
1.9.2 Défaut rotoriques.....	26
1.10 Recherche indispensable des symptômes.....	27
1.11 Conclusion.....	28

## **Chapitre 2 : Les méthodes de diagnostic dans la machine asynchrone**

2.1 Introduction .....	29
2.2 Caractéristiques souhaitables d'un système de diagnostic.....	29
2.2.1 Rapidité et sensibilité de détection.....	30
2.2.2 Robustesse.....	30
2.2.3 Identification de nouveaux défauts.....	30
2.2.4 La localisation.....	30
2.2.5 Adaptabilité.....	30
2.2.6 Identification des défauts multiple.....	31

2.2.7 Estimation d'erreur de classification.....	31
2.2.8 Facilité d'explication.....	31
2.3 Transformation des mesures dans un système de diagnostic.....	31
2.4 Classification des méthodes de diagnostic.....	32
2.4.1 Approche à base de modèle qualitatif.....	33
2.4.2 Approche à base de modèle quantitatif.....	34
2.4.3 Approche à base d'extraction de caractéristiques qualitatives.....	34
2.4.4 Approche à base d'extraction de caractéristiques quantitatives.....	34
2.4.4.1 La méthode statistique.....	35
2.4.4.2 Les méthodes non statistiques.....	35
2.5 Méthodes basées sur une approche système.....	35
2.5.1 Réseaux de neurones.....	36
2.5.2 Reconnaissance de forme (RdF).....	37
2.5.3 Méthodes de coalescence (Clustering).....	38
2.5.4 Méthodes de prises de décision (classification).....	38
2.5.4.1 Discriminant Linéaire – ACP.....	39
2.5.4.2 Les K plus proches Voisins (K- Nearest Neighbors).....	39
2.6 Méthodes reposant sur une approche signal.....	39
2.6.1 Transformée de Hilbert (TH).....	40
2.6.2 Transformée de Fourier Rapide (TFR).....	40
2.6.3 Transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG).....	40
2.6.4 Transformée en ondelettes (TO).....	40
2.7 Autres méthodes de diagnostic.....	40
2.7.1 Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques.....	40
2.7.2 Diagnostic par mesure de flux magnétique.....	41
2.7.3 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique.....	41
2.7.4 Diagnostic par mesure de la puissance instantané.....	41

2.7.5 Diagnostic par mesure du courant statorique.....	42
2.8 Choix de méthodes de surveillance pour notre application.....	42
2.9 Conclusion.....	43

### Chapitre 3 : Approche signal

3.1 Introduction .....	44
3.2 Modélisation de la machine asynchrone .....	44
3.2.1 Modèle triphasé .....	45
3.2.2 Modélisation du stator .....	46
3.2.2.1 Structure du stator .....	46
3.2.2.2 Les équations électriques statoriques .....	46
3.2.3 Modélisation du rotor .....	48
3.2.3.1 Structure du rotor.....	48
3.2.3.2 Equations des tensions rotoriques.....	49
3.2.4 Système d'équations global de la machine.....	52
3.2.5 Présentation de l'onduleur.....	52
3.3 Description de l'entraînement .....	53
3.4 Résultats de simulation.....	54
3.4.1 Machine saine .....	54
3.4.2 La signature spectrale du courant statorique de la machine saine .....	56
3.4.3 Défaut au stator de la machine.....	56
3.4.3 Défaut rotor.....	57
3.4.4 Comportement défaillant de l'onduleur.....	58
3.4.5 Caractérisation du défaut capteur de courant.....	60
3.4.6 Effet d'un défaut sur le capteur de vitesse.....	61
3.5 La partie mécanique.....	62
3.5.1 Modèles utilisés.....	62

3.5.2 Les roulements.....	63
3.6 Conclusion.....	66

## Chapitre 4 : Approche modèle

4.1 Introduction.....	67
4.2 Méthodes à base d'observateurs.....	67
4.2.1 Différents types d'observateurs .....	68
4.3 Modèle de la machine asynchrone.....	69
4.3.1 Modèle continu.....	70
4.3.1.1 Equations électriques .....	70
4.3.1.2 Equations mécaniques .....	71
4.4 Modèle stochastique.....	71
4.4.1 Le modèle ' bon fonctionnement' pour le contrôle et de surveillance.....	71
4.4.2 Modèle discret de la machine asynchrone .....	72
4.5 Surveillance de la machine par des observateurs .....	72
4.5.1 La théorie du filtre de Kalman .....	72
4.5.2 Equations de synthèse d'un observateur de Kalman particulier .....	73
4.5.2.1 Equations de base .....	73
4.6 Le filtre de Kalman étendu .....	75
4.6.1 Synthèse de filtre de Kalman étendu .....	75
4.7 Modèle des défauts pour la synthèse des observateurs .....	75
4.7.1 Machine.....	75
4.7.2 Défaut rotor .....	76
4.7.3 Défaut stator .....	77
4.7.4 Défaut capteur.....	78
4.7.5 Défaut onduleur.....	78
4.8 Résultats de simulation.....	79

4.8.1 Sans défaut .....	79
4.8.2 Défaut au rotor.....	82
4.8.3 Défaut au stator.....	83
4.9 La démodulation synchrone appliquée à la résistance rotorique.....	86
4.9.1. Démodulation par détection synchrone.....	86
4.10 Défaut d'onduleur.....	87
4.11 Conclusion.....	90
CONCLUSION GENERALE .....	91
BIBLIOGRAPHIE.....	92-108

# Introduction générale

---

Actuellement, les machines asynchrones sont considérées comme l'outil de conversion électromécanique le plus utilisé dans le milieu industriel. Cet engouement pour ce type de machine est justifié par sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et sa robustesse mécanique. Des applications de la machine asynchrone à vitesse variable, ont vu le jour dans divers domaines en l'occurrence l'aéronautique, la robotique et dans certains mécanismes industriels à haute précision. Toutefois, cette machine peut être affectée par des défauts potentiels qui se répercutent sur la sécurité de la production, la qualité du service et la rentabilité des installations. Par conséquent, il est très intéressant de développer des systèmes de diagnostic pour détecter de manière anticipée les défauts pouvant surgir dans ce type de machines.

L'apparition d'un défaut conduit le plus souvent à un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone entraînant, en conséquence, un coût de réparation non négligeable pour l'entreprise (cas des machines de fortes puissances) sans oublier la perte de production occasionnée. Dans le domaine nucléaire, par exemple, il est indispensable d'assurer la sécurité des personnes et du matériel car aucun système, qu'il soit simple ou complexe, n'est à l'abri d'un dysfonctionnement.

En effet, malgré sa robustesse légendaire, la machine asynchrone triphasée subit, au cours de sa durée de vie, un certain nombre de sollicitations externes et internes qui la rendent, potentiellement, défaillante. Malgré, l'augmentation croissante des exigences industrielles en termes de fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité, il était important de disposer d'un certain nombre d'outils et de techniques permettant de diagnostiquer l'état de la machine. Ces outils de diagnostic sont basés sur la détection de la signature des défauts au niveau des grandeurs mesurables habituelles dans l'industrie (grandeurs électriques statoriques) soit par le biais de l'analyse du contenu harmonique de ces grandeurs soit encore par le biais de l'observation comportementale de la machine.

Notre thèse s'intéresse à la surveillance et au diagnostic des défauts des moteurs asynchrones. Elle s'articule autour de quatre chapitres.

Dans le premier chapitre nous présenterons un rappel sur la constitution de la machine asynchrone à cage d'écurueil et les différentes défaillances pouvant l'affecter. Nous avons mis, surtout l'accent sur trois défauts les plus récurrents d'après les statistiques, à savoir : les défauts de roulement, les défauts statoriques et les défauts rotoriques.

Le deuxième chapitre est consacré aux différentes techniques et méthodes employées dans le domaine de surveillance et de diagnostic en citant les différentes approches. Une classification en deux grandes parties: méthodes à base de modèle analytique (espace de parité, observateur, redondance analytique...) et méthode dites sans modèle (traitement de signal, reconnaissance de forme, experts...).

Le chapitre trois est consacré à l'approche signal. Plusieurs techniques de diagnostic ont été développées. Elles se basent sur le traitement et l'analyse du signal temporel ou fréquentiel du courant statorique. Pour cela un modèle déjà connu dans la littérature est utilisé pour la simulation. Les scénarios de simulation sont faits avec des valeurs numériques précises.

Une solution alternative à l'approche signal est proposé dans le chapitre quatre, à savoir, l'approche modèle qui repose sur les observateurs d'état étendu. Des filtres étendus à base de modèle linéaire sont appliqués pour le diagnostic. Les défauts introduits (suppression de 40% de spires par exemple) sont introduits en simulation (donc sur le modèle).

Nous terminons ce mémoire par une conclusion portant sur les travaux effectués et par une présentation des perspectives de recherche pouvant être envisagées.

## Chapitre 1

---

### Diagnostic de la machine asynchrone

---

## 1.1 Introduction

Le diagnostic est une composante principale du module de supervision. Il consiste à déterminer à chaque instant le mode de fonctionnement dans lequel le système se trouve. Il s'appuie sur une connaissance à priori des modes de fonctionnement et sur une connaissance instantanée matérialisée par une nouvelle observation de l'état du système.

Au cours de leur durée de vie, les machines électriques tournantes sont bien souvent soumises à des sollicitations sévères qui peuvent conduire à un certain nombre de défaillances. Ces défaillances peuvent évidemment concerner les différents sous-systèmes des entraînements électriques. Il existe plusieurs approches pour réaliser le diagnostic, le choix d'une approche est lié au mode de représentation de la connaissance.

Ce premier chapitre fait état des différentes origines (électriques, mécaniques,...) des défaillances qui peuvent se produire sur la machine asynchrone. Ça débute par un rappel sur la constitution des machines électriques, et plus particulièrement sur celle de la machine asynchrone. Nous évoquerons essentiellement les défauts qui peuvent survenir tant au stator qu'au rotor et dans les enroulements de la machine ainsi que leurs statistiques. Mais on va commencer par définir les différentes terminologies utilisées.

## 1.2 Terminologie relative au diagnostic

**Diagnostic** : ensemble d'actions visant à évaluer l'état d'un procédé à partir de la connaissance de son fonctionnement. A partir de l'observation du procédé on détermine, par comparaison avec les divers états de fonctionnement connus, l'origine de ces défaillances, leurs causes et le degré de défaillance du système.

**Défaut (panne, défaillance)** : évènement engendrant une modification du fonctionnement du procédé. L'état ne correspond plus à un fonctionnement normal. Le système n'est plus apte à assurer totalement sa fonction.

**Identification de défauts** : détermination de la taille et du comportement temporel d'un défaut. C'est une fonction qui suit la localisation [LOU-06].

**Disponibilité** : faculté d'un matériel ou d'un système à pouvoir fonctionner chaque fois que cela est nécessaire, chaque fois qu'on le sollicite, c'est-à-dire que l'on assure une fiabilité totale pendant les phases de fonctionnement. La disponibilité nécessite des opérations de maintenance préventive afin de prévenir tout vieillissement ou défaillance.

**Fiabilité** : capacité d'un système à fonctionner pendant un certain temps sans panne ; elle se caractérise par le temps moyen de bon fonctionnement.

**Sécurité** : ce terme regroupe les notions de disponibilité, fiabilité, maintenabilité et sécurité du système. Elle caractérise la confiance que l'on peut apporter au fonctionnement.

**Surveillance** : ensemble de fonctions s'exécutant en temps réel ayant pour but de reconstituer l'état réel du procédé au sein des modèles utilisés par le système de conduite du procédé. Elle consiste à l'enregistrement de l'information ainsi qu'à la reconnaissance et l'indication des comportements anormaux [LOU-06].

**Supervision** : représente la surveillance d'un système physique et la prise de décisions appropriées en vue de maintenir son opération face à des défaillances [LOU-06].

**Perturbation** : signal d'entrée non contrôlé dont la présence est non souhaitable mais considérée comme normale [LOU-06].

**Symptôme** : changement d'une quantité observable par rapport à un comportement normal [LOU-06].

**Dysfonctionnement** : exécution d'une fonction du système au cours de laquelle le service rendu n'est pas délivré ou il est délivré de manière incomplète [LOU-06].

**Résidu** : les résidus (Residual) sont définis comme étant des indicateurs de défauts. Ils expriment l'écart par rapport au fonctionnement normal dans un espace de représentation donné. Cet espace dépend de la nature des informations manipulées (variable numérique, booléenne, variable qualitative, forme). C'est sur la base de leurs valeurs que la décision de détection est prise ou pas. Souvent, les résidus sont considérés nuls (statistiquement) en l'absence de défaut.

**Maintenance-maintenabilité** : la maintenance est définie comme étant « toutes les activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management». Maintenir, c'est donc effectuer des opérations (dépannage, graissage, visite, réparation, amélioration...etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel, pour assurer la continuité et la qualité de la production. Bien maintenir, c'est assurer ces opérations pour que le coût global soit optimum. La figure I.1 représente le diagramme des différents concepts de maintenance et les événements associés.

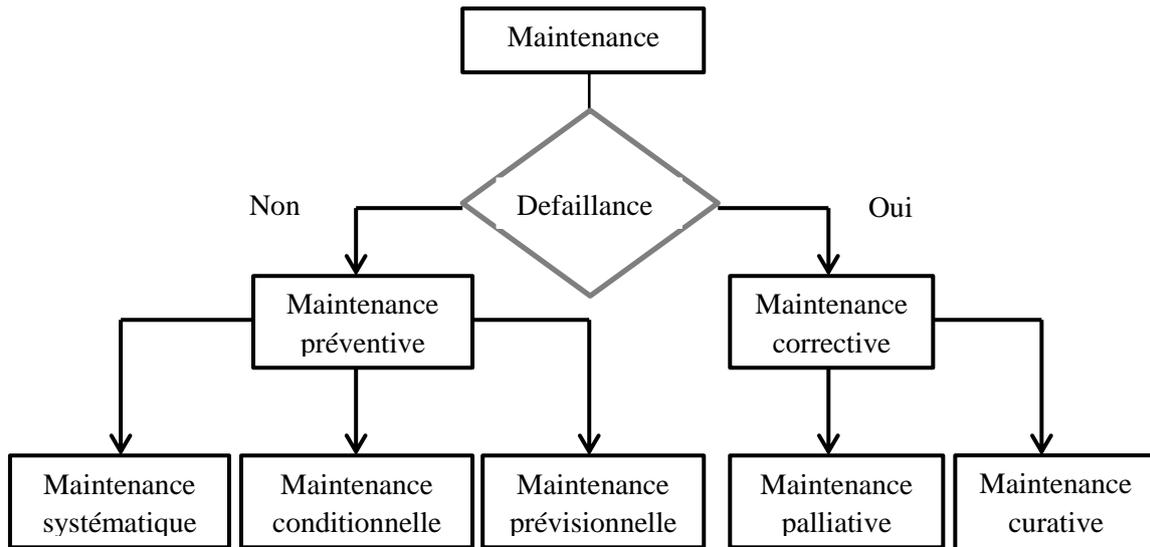


Figure I.1 Diagramme des différents concepts de maintenance

On peut citer trois types de maintenance :

**Maintenance corrective** : intervient après la détection et la localisation d'un défaut.

**Maintenance préventive** : maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. C'est une intervention de maintenance prévue, préparée et programmée avant la date probable d'apparition d'une défaillance.

**Maintenance conditionnelle** : alternative à la maintenance systématique, fait l'objet d'une demande croissante dans un grand nombre d'applications industrielles. Cette maintenance est basée sur la surveillance en continu de l'évolution du système, afin de prévenir un dysfonctionnement avant qu'il n'arrive. Elle n'implique pas la connaissance de la loi de dégradation. La décision d'intervention préventive est prise lorsqu'il y a évidence expérimentale du défaut imminent, ou approche d'un seuil de dégradation prédéterminé. Elle impose donc des traitements en ligne, au moins une partie.

Pour accomplir ces fonctions, la maintenance nécessite de connaître l'état de fonctionnement des systèmes. La surveillance donne une réponse aux besoins d'information de la maintenance, sa définition est la suivante: La surveillance est un dispositif passif, informationnel qui analyse l'état du système et fournit des indicateurs. La surveillance consiste notamment à détecter et classer les défaillances en observant l'évolution du système puis à le diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et en identifiant les causes premières. La surveillance se compose donc de deux fonctions principales qui sont la détection et le diagnostic.

La maintenance nécessite de connaître les régimes de fonctionnement des systèmes alors que la surveillance donne une réponse aux besoins d'information de la maintenance dans le but de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic est une partie de la surveillance qui a pour objectif de trouver les causes de dysfonctionnement.

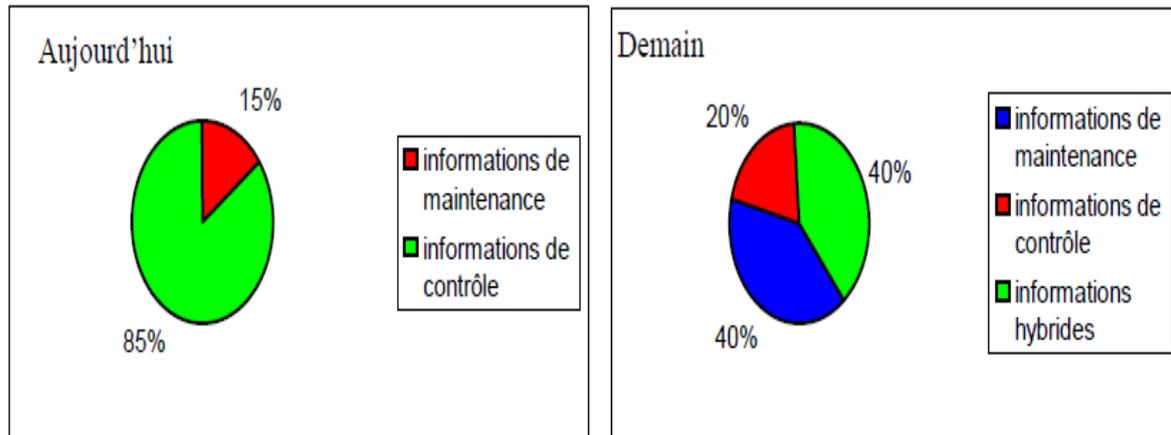


Figure I.2 Evolution des informations traitées par le système

### 1.3 Etude et synthèse bibliographique

Durant les trois dernières décennies, le diagnostic de la machine asynchrone a connu un engouement croissant de la part de la communauté scientifique. Nous pouvons scinder ces travaux de recherche en trois grandes approches :

- Modèle
- Signal
- Système

L'approche modèle consiste à la modélisation analytique de la machine [DID-04]. Les travaux de Lipo [LIP-71], [LIP-75], [LIP-84] et [COR-77], tous, portent sur la modélisation fine de la machine. Ceux de Toliyat se caractérisent par la fonction d'enroulement et la prise en compte des harmoniques d'espaces [TOL-91]-[TOL-94]. Par contre, les études de Ritchie [RIT-04] se basent sur le modèle multi-enroulements. Ces travaux ont largement enrichi la modélisation fine orientée vers le diagnostic. Les recherches de Filippetti sont axées au diagnostic des défauts du moteur à induction par l'utilisation de la technique de l'intelligence artificielle [FIL-00] - [FIL-98] et les réseaux de neurones [FIL-95].

L'approche signal consiste à la détection d'indicateurs ou signatures de défauts [DID-04]. Cette opération est réalisée par l'extraction et la quantification des grandeurs électriques ou mécaniques mesurables d'indices fiables liées aux défauts. Des travaux ont été illustrés par la recherche d'indicateurs internes (champ magnétique, ..) [DID-04], d'autres par des indicateurs externes (tension, courant, couple, vitesse...) [DID-04].

L'approche système consiste à l'extraction et à la classification ou l'interprétation des résultats. Une forme d'automatisation de la procédure de diagnostic depuis l'acquisition jusqu'à la prise de décision a été développée et présentée [LEB-06].

Les travaux se rapportant au sujet de surveillance et de diagnostic ont commencé dès le début des années soixante-dix [LIP-71], [LIP-75] et [COR-77]. En 1984, Kerszenbaum [KER-84] a présenté, analytiquement et expérimentalement, des résultats sur la présence de courants interbarres très importants dans les machines où les impédances des interbarres sont similaires à celles des barres rotoriques. Ces courants sont produits par la présence d'une cassure de barre ou d'une portion d'anneau.

La première est basée sur l'analyse du spectre fréquentiel du courant statorique. La deuxième méthode utilise l'information donnée par la phase du spectre du courant statorique. La troisième emploie l'information donnée par la phase de la transformée de Hilbert du module du spectre du courant statorique.

En 2004, Ritchie [SIT-04] a proposé un système d'identification et de classification des défauts de la machine asynchrone. Ce système est basé sur les réseaux de neurones à base de fonction radiale (RBF). Le système développé par cet auteur permet la détection des défauts électriques et mécaniques de la machine asynchrone. L'auteur [OND-06] a proposé une méthode de sélection des paramètres basée sur un algorithme génétique. Il permet une réduction notable de la dimension de ce vecteur sans perte sensible d'information.

Hemsas kamel eddine [HEM-06] a présenté un nouveau modèle d'estimation sans capteur des grandeurs non accessibles de la machine asynchrone en vue de la commande et la surveillance, en se basant sur les techniques de l'intelligence artificielle, telle que les réseaux de neurones artificiels et les réseaux neuro-flous. En outre, il a donné la notion de filtre de Kalman étendu neuro-flou pour l'estimation des paramètres internes de la MAS.

L'auteur [LEB-06] a proposé une nouvelle méthode basée sur la représentation temps fréquence optimale, dite "dépendante de la classe du signal (DCS)" dont le plan d'ambiguïté est lissé par un noyau conçu spécialement afin de réaliser une séparation maximale entre la classe de défaut et la classe de la machine saine. La séparation de classes est réalisée par le contraste de Fisher, basée sur la compacité et la séparabilité des classes. Le critère d'affectation ou du classement d'un nouveau signal est basé sur la distance Mahalanobis et le modèle de Markov caché.

## 1.4 Formulation du problème

Les impératifs de fiabilité et de productivité des machines électriques nécessitent l'intégration de système de détection et de diagnostic des défaillances. Il faut donc doter les moteurs asynchrones d'outils de surveillance; ainsi, nous pourrions éviter ou du moins prévenir les pannes et les arrêts intempestifs.

En général, les défauts de la machine asynchrone résident dans les différents modes de fonctionnement, la charge, l'environnement...etc. Parmi ces défauts, on peut citer :

- Déséquilibre de tension d'alimentation
- Cassure des barres rotoriques et portion d'anneaux
- Défauts statoriques

- Défaut des roulements
- Défaut d'excentricité

En 1985, O'Donnell [O'DO-85] a présenté une étude statistique sur les causes des défauts dans la MAS. Bonnett, en 1992 [BON-92], a exposé une étude d'identification des différentes causes des défauts dans le stator et le rotor à cage. Une analyse des défauts de roulements est publiée ultérieurement par le même auteur, en 1993, [BON-93].

Filippetti, [FIL-95] a introduit les réseaux de neurones, pour le diagnostic des défauts rotoriques de la machine asynchrone, notamment pour la détection et l'estimation du nombre de barres cassées. Schoen [SCH-95] a présenté une nouvelle méthode pour la détection en ligne des défauts dans la MAS par la surveillance du courant statorique en se basant sur les réseaux de neurones artificiels. Ses essais prouvent l'intérêt des réseaux de neurones pour la classification et la prise de décision. Une autre étude statistique des défauts a été réalisée par Thorsen, [THO-95], sur des machines de grande puissance utilisées dans l'industrie pétrochimique.

En 2000, Naït Saïd [NAI-00] a introduit le filtre de Kalman dans une étude paramétrique pour la détection des barres cassées en vue de l'estimation, sans capteur, de la résistance rotorique.

Une autre étude par Nejjari, [NEJ-00], dans laquelle il a présenté une méthode pour le diagnostic des défauts électriques, basée sur l'approche du vecteur de Park en utilisant la technique des réseaux de neurones artificiels comme critère de décision pour la discrimination entre les cas sain et défaillant. Devanneaux [DEV-01] a implanté un modèle transitoire de machine à cage d'écureuil avec défauts rotoriques, en utilisant une approche basée sur le couplage magnétique des circuits électriques.

Bachir [BAC-02] a abordé une étude sur le diagnostic et la surveillance de la machine asynchrone par estimation paramétrique. Il a présenté les différents outils théoriques nécessaires à l'identification et à la modélisation en vue du diagnostic des procédés industriels. Cette méthodologie de surveillance est appliquée expérimentalement au cas élémentaire d'une bobine à noyau de fer. Finalement, il a proposé un modèle de défauts simultanés stator/rotor (court-circuit de spires dans les enroulements, ruptures de barres,...) pour une surveillance généralisée de la machine. Diallo [DIA-03] a étudié la faisabilité de la détection et de diagnostic de défaut de la machine asynchrone causé par une défaillance dans l'un des six interrupteurs de l'onduleur. La méthode proposée est basée sur la mesure du vecteur de courant dans le repère de Concordia par l'utilisation de deux capteurs, pour des raisons de simplicité et de coût. Les résultats de simulation comparés aux résultats expérimentaux montrent la faisabilité de l'approche proposée. L'auteur [CAS-03] a appliqué la reconnaissance de formes (RdF) pour le diagnostic des défauts de la machine asynchrone.

Didier [DID-04] a développé, pour le diagnostic et la surveillance de la machine asynchrone en absence et en présence de défaillances, un modèle basé sur le couplage magnétique des circuits électriques. Trois méthodes de diagnostic sont présentées, pour détecter la présence du défaut au sein de la cage rotorique (cassure de barres).

## 1.5 Objectifs et contributions souhaités

En effet, malgré sa robustesse légendaire, la MAS triphasée subit, au cours de sa durée de vie, un certain nombre de sollicitations externes et internes qui la rendent, potentiellement, défaillante. Malgré, l'augmentation croissante des exigences industrielles en termes de fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité, il était important de disposer d'un certain nombre d'outils et de techniques permettant de diagnostiquer l'état de la machine. Ces outils et techniques de diagnostic sont basés sur la détection de la signature des défauts au niveau des grandeurs mesurables habituelles dans l'industrie (grandeurs électriques statoriques) soit par le biais de l'analyse du contenu harmonique de ces grandeurs soit encore par le biais de l'observation comportementale de la machine.

Notre objectif est de synthétiser un certain nombre de méthodes et techniques de diagnostic et d'établir des critères de choix pour leur utilisation afin d'apporter une contribution concrète dans ce domaine de recherche très avancés.

### **L'originalité du travail de la thèse se résume**

Nous avons choisi la méthode basée sur l'estimation d'un des paramètres de la machine qui est la résistance rotorique via un modèle mathématique en utilisant le filtre de Kalman étendu (FKE). Cet observateur d'état s'est avéré un outil utile pour déterminer les variations du paramètre [CHA-14], [FER-13]. Dans ce document, on montre par la simulation que FKE peut être employé pour identifier la perturbation dans la résistance rotorique. Récemment le filtre de Kalman a été appliqué avec succès au pronostic de défaut [BOU-07] par exemple il est employé pour interpoler les tendances d'un signal apprise à partir des données enregistrées et estimer alors l'évolution des défauts pour le diagnostic proposé [LEB-08]. **Notre approche dans ce travail est que les travaux précédents considèrent la valeur de la résistance rotorique comme fixe pour la surveillance. Cette valeur dans l'outil de diagnostic que l'on utilise n'est pas fixe contrairement aux approches classiques de contrôle de machine. Pour cela on propose une méthode qui tient en compte une variation de la résistance rotorique afin de donner une bonne estimation ainsi pour une bonne robustesse de la commande de la machine asynchrone.**

## 1.6 La machine asynchrone

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car il présente de nombreux avantages tels que sa puissance massive, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc... L'apparition dans les années 1980 des variateurs permettant de faire varier la fréquence de rotation dans une large gamme a grandement favorisé son développement. En effet, il entre dans la conception de nombreux procédés industriels associant des convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, laminoirs, levage, pompe, etc...).

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. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les deux dernières décennies.

### 1.6.1 Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettrons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. Dans ce travail, nous nous intéressons à la machine asynchrone.

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la figure I.3.

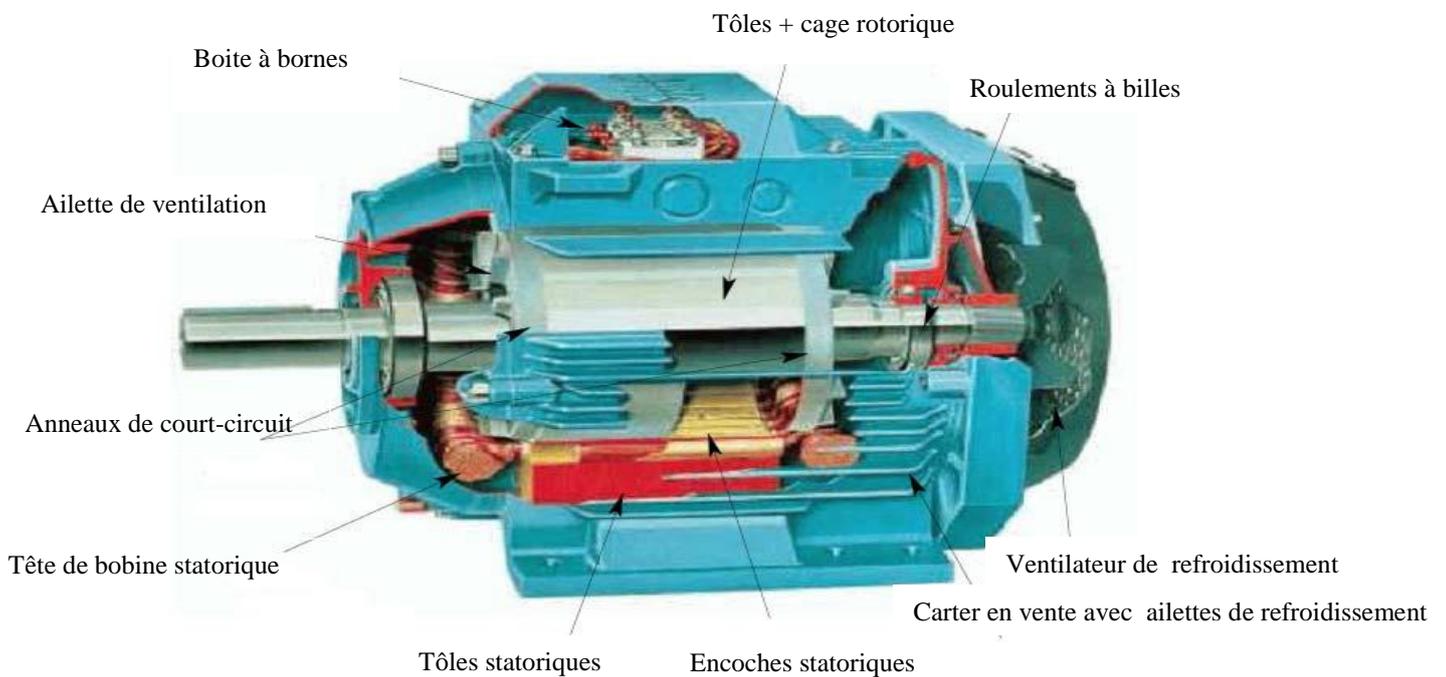


Figure I.3 Eléments de constitution d'une machine asynchrone [DID-04]

### 1.6.1.1 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 I.4). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines [OND-06].

Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.

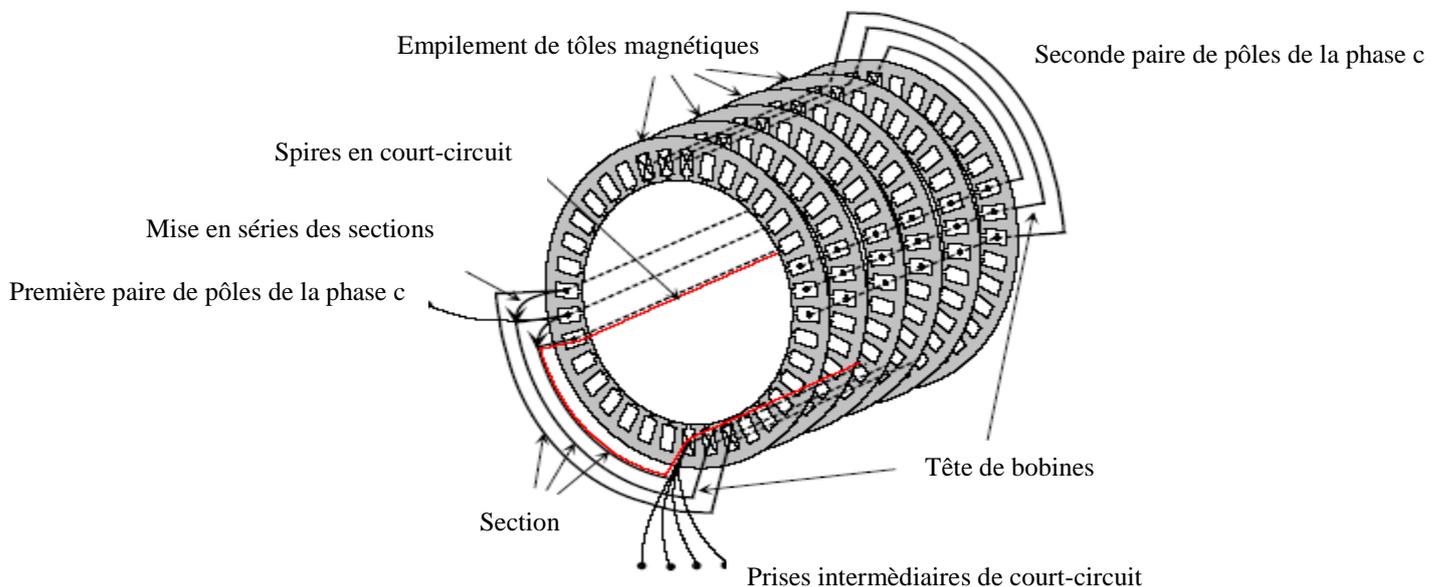


Figure I.4 Vue schématique en perspective du stator [SCH-99]

### 1.6.1.2 Le rotor à cage

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (figure I.5). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [KER-84].

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 plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).

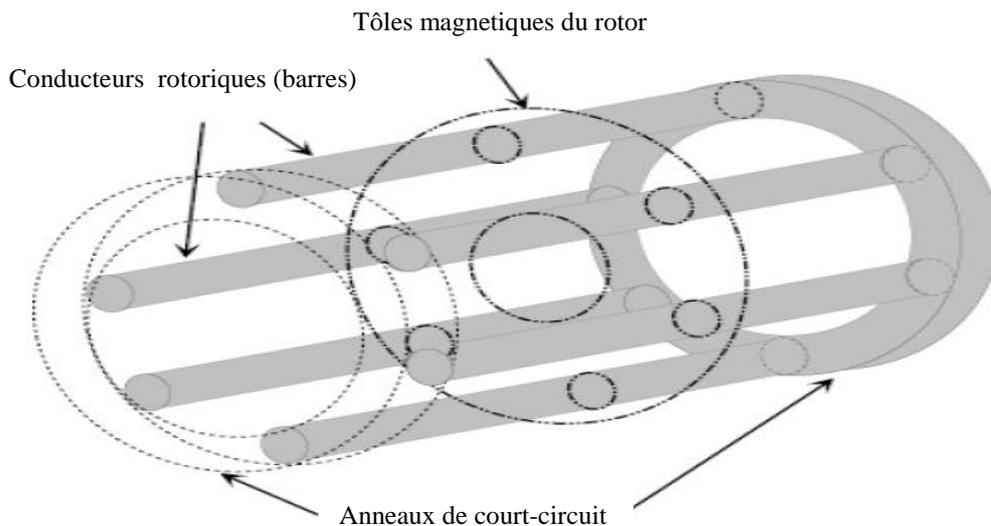


Figure I.5 Vue schématique en perspective du rotor [SCH-99]

### 1.6.1.3 Organes mécaniques

La carcasse sert de support. Elle 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, généralement, constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des plusieurs efforts :

- Efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale,...etc.).
- Efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges.
- Efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent et transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dus aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont, généralement, à roulements pour les machines de petite et moyenne puissances [OND-06].

Afin d'assurer la variation de vitesse des moteurs électriques mais aussi la conversion de l'énergie, de nombreuses machines se voient associer à un convertisseur. Ainsi, de nos jours, on trouve dans un grand nombre de procédés industriels, des associations entre des convertisseurs statiques et des machines électriques (pompage, levage,... etc). Cela permet de fournir aux moteurs des tensions et des courants de fréquence variable servant à commander la machine en couple ou en vitesse [OND-06].

## 1.7 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur les lois de l'induction ; la machine asynchrone est considérée comme un transformateur à champ magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court-circuit.

Ce fonctionnement est reposé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant.

Lorsque le rotor tourne à une vitesse  $N_S$  différente du synchronisme, l'application de la loi de FARADAY à un des roulements rotoriques montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice qui étant court-circuité sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limitée par l'impédance de ce dernier. L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine. Lorsque le champ est sinusoïdal, sa vitesse de rotation est:

$$N_S = \frac{f}{p} \text{ en tr/s } \text{ ou } N_S = \frac{60f}{p} \text{ en tr/min} \quad (\text{I.1})$$

Où  $f$ : est la fréquence d'alimentation.

$p$ : représente le nombre de paires de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant ( $n_1$ ) diffère de celle du rotor ( $n$ ), c'est à dire lorsque  $n \neq n_1$ , car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque  $n = n_1$ , le champ serait immobile par rapport au rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

Le rapport  $g = \frac{n_1 - n}{n_1}$  est appelé glissement de la machine asynchrone. (I.2)

## 1.8 Les défaillances dans la machine asynchrone

Nous rappelons brièvement les différents défauts de la machine asynchrone triphasée à cage ainsi que leurs origines sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Ces défauts apparaissent dans les différentes parties constituant la machine.

### 1.8.1 Défaits internes et externes

Il existe deux types de défauts principaux : internes et externes. Nous pouvons ainsi remarquer que les défauts internes de la machine sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques rotorique et statorique, bobinages statoriques, entrefer mécanique, cage rotorique,...) alors que les défauts externes sont provoqués, soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique, soit par l'environnement de l'utilisation de la machine.

D'après les organigrammes des figure I.6 et figure I.7, les origines des défauts sont diverses; nous citerons à titre indicatif des origines de type :

- Mécaniques: mauvaise fabrication, vibrations de la machine, force électromagnétiques déséquilibrées, force centrifuge, fluctuations de la charge.
- Electriques: dégradations d'isolement, décharges partielles, étincelles.
- Thermiques: pertes dans le cuivre, manque de refroidissement général ou localisé.
- Environnementales: humidité, ozone, poussière.

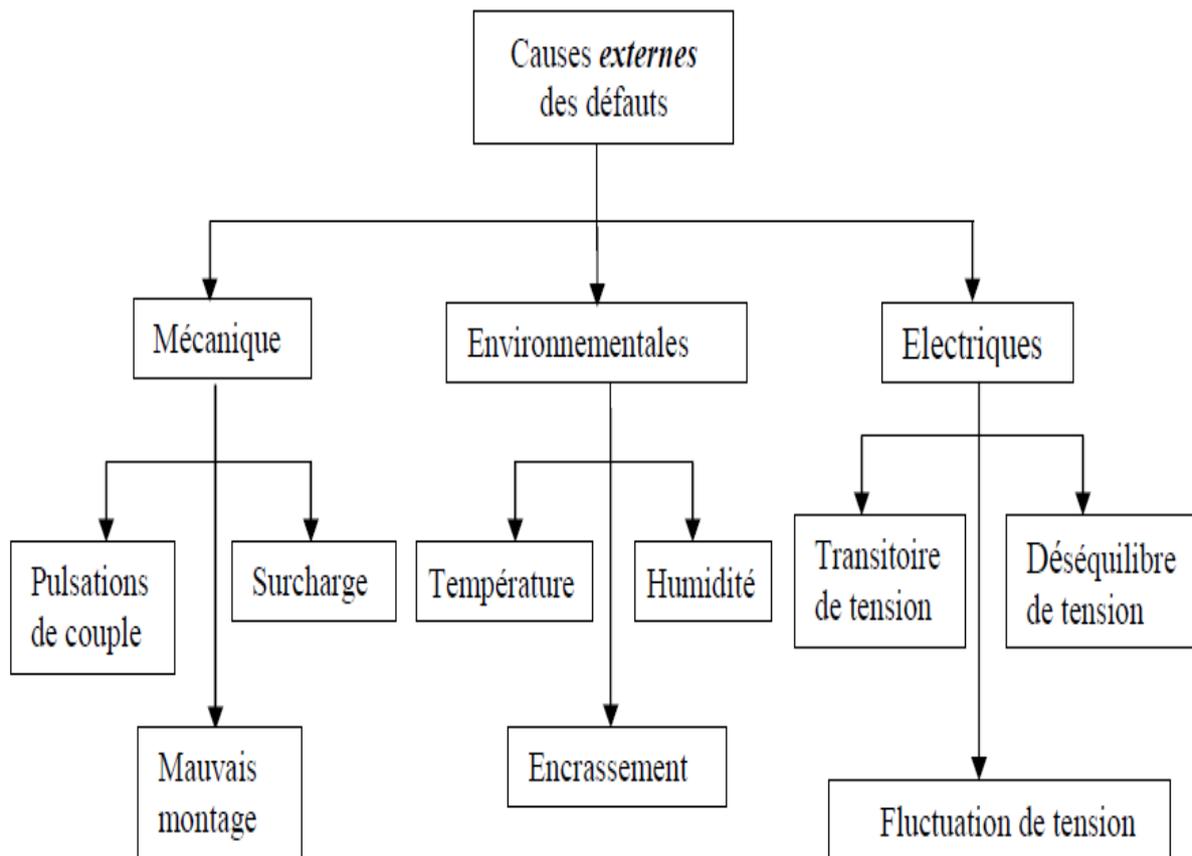


Figure I.6 Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage [KHA-08]

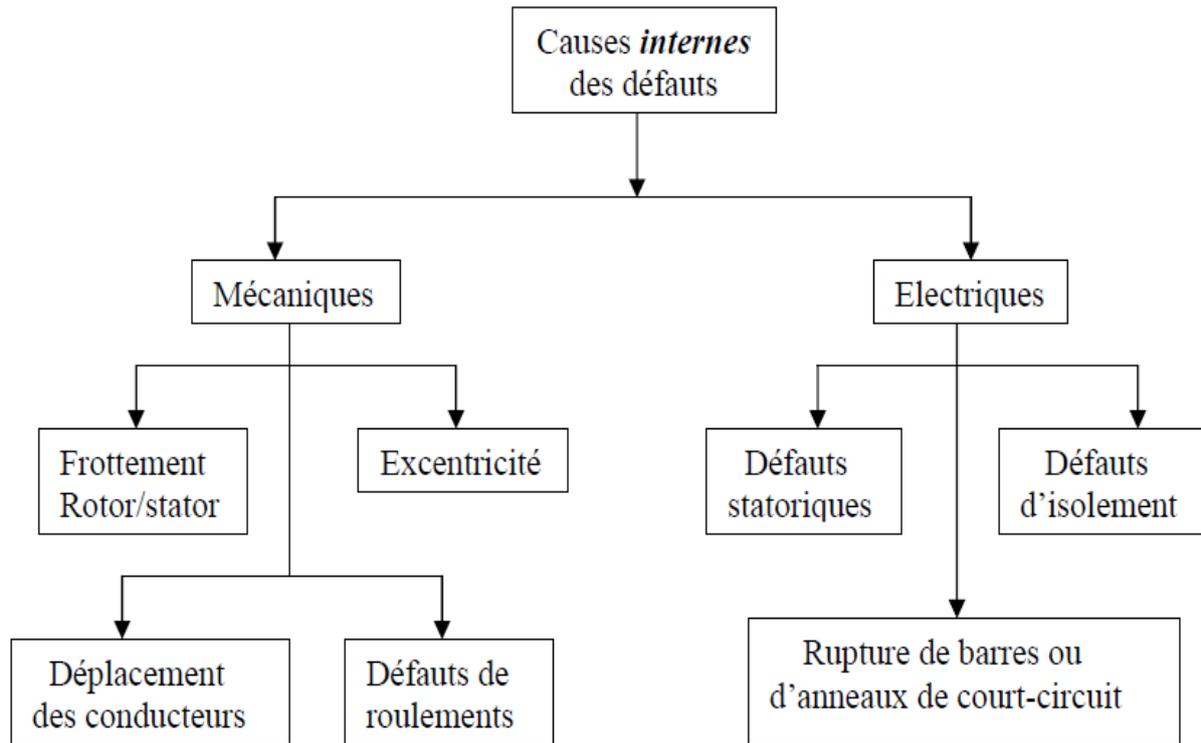


Figure I.7 Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage [KHA-08]

Réputée pour être robuste, la machine asynchrone n'est jamais à l'abri des défaillances, ces anomalies donnent lieu à un comportement anormal de la machine et peuvent à court ou à long terme provoquer son endommagement. Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent être classées en trois groupes [O'DO-85] :

- **Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts:** surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, ...
- **Les amplificateurs de défauts:** tel que ; surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, 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, ...

Dans ce contexte, plusieurs études statistiques ont été effectuées sur la fiabilité des machines électriques réalisées par différents groupes industriels, où les machines fonctionnant dans différentes applications et dans différentes branches de l'industrie, parmi ces études on peut citer sans être exhaustif: l'étude réalisée par la compagnie "General Electric", publiée dans EPRI (Electric Power Research Institute) [EPR-82], l'étude de Thorsen et Dalva [THO-99] et Allianz [ALL-88].

A partir de ces travaux, il apparaît clairement que l'occurrence d'un type spécifique de défaut dépend principalement de l'application spécifique de la machine et de l'environnement de fonctionnement. Ainsi, la gamme de puissance des machines asynchrones joue un rôle très considérable, par exemple on trouve que le taux des pannes dues aux roulements est très élevé dans les machines de grande puissance (de 100 KW à 1 MW), par contre pour les machines de moyenne puissance (de 50 KW à 200 KW) les défauts statoriques et rotoriques sont les plus apparus.

D'autre part, Il est connu que l'occurrence d'un type quelconque de défauts dépend fortement de l'application typique de la machine. Par exemple, il a été constaté que ; dans des machines asynchrones à cage, les défauts de la cage rotorique sont plus élevés que les défauts d'enroulement statorique pour les applications où la machine est fréquemment arrêtée et remise en marche sous une charge importante (machines à outils et les industries minières) [IBR-09].

L'environnement semble donc jouer un rôle prépondérant dans le type de défauts et leurs fréquences. Ainsi, il a été établi que le taux de panne pour des moteurs utilisés en extérieur, où l'environnement est humide (aux usines terrestres et en mer par exemple), peut-être 2,5 fois plus grand que le taux d'échec pour des moteurs utilisés à l'intérieur.

## **1.8.2 Défaillance d'ordre mécanique**

Les défaillances d'ordre mécanique, en général, les plus souvent rencontrées parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone. Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur. On énumèrera par la suite certains de ces défauts.

### **1.8.2.1 Défaillances du flasque**

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine.

### **1.8.2.2 Défaillances de l'arbre**

L'arbre de la machine peut laisser apparaître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt immédiat de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi à une fatigue supplémentaire. Une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance [TAB-02].

### 1.8.2.3 Défaillances des roulements mécaniques

Le roulement à billes est un organe de base dans la machine asynchrone qui joue le rôle d'interface mécanique entre le stator et le rotor. En plus, il représente l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant de garantir une bonne rotation du rotor. La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux. Le roulement à billes est le plus utilisé dans le monde industriel parce qu'il a le meilleur rapport performance-prix [IBR-09].

Le roulement est composé des éléments suivants [IBR-09]:

- Deux bagues concentriques en acier, appelées bague intérieure et bague extérieure, comportant des chemins de roulement (surfaces sur lesquelles "roulent" les corps roulants).
- Des corps roulants, billes ou rouleaux généralement en acier, permettant le mouvement des deux bagues avec un frottement minimal.
- Une cage séparant et guidant les corps roulants (en polyamide, tôle acier, laiton ou résine).

La figure I.8 montre la construction typique d'un roulement à billes.

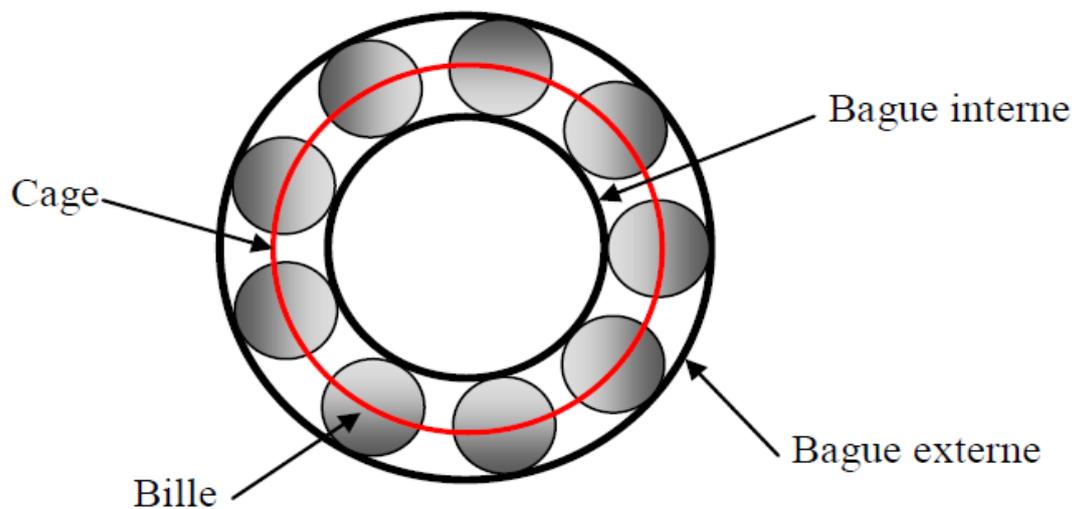


Figure I.8 Structure d'un roulement à billes [IBR-09]

Suivant l'emplacement géométrique du défaut dans le roulement, nous pouvons distinguer les types de défauts suivants [BON-93]:

- Défaut de bague extérieure
- Défaut de bague intérieure
- Défaut de billes

D'après des études statistiques [THO-95], les défauts de roulement représentent à eux seuls entre 40% et 50% des défauts des machines asynchrones triphasées. Ils constituent donc les défauts les plus fréquents sur les machines asynchrones notamment les machines de fortes puissances. Les roulements peuvent être endommagés par les causes suivantes [IBR-09], [BON-93], [VAS-09] :

- Contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable, etc.
- Corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides, ...
- Lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement.
- Mauvais alignement du rotor.
- Une température de fonctionnement élevée.
- Courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques.
- Installation inexacte du roulement ; en forçant incorrectement le roulement sur l'arbre du rotor ou dans les flasques (dû au désalignement), des entailles seront formées sur les chemins de roulement.

Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine. Dans le cas, le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur. Par conséquent, le traitement de ce type de défaut prend une place prépondérante et constitue une piste privilégiée dans le domaine de diagnostic des défauts de la machine asynchrone [BLO-08, ESF-14].

#### **1.8.2.4 Autres défaillances mécaniques**

Au stator, il n'y a pas de pièces mobiles donc à priori pas de défaillances mécaniques. Cependant, il peut apparaître des phénomènes d'oxydation liés à l'environnement de la machine et plus précisément au taux de salinité qui influe sur l'étanchéité et les contacteurs [OND-06].

### **1.8.3 Défaillances d'autres origines**

#### **1.8.3.1 Défaut de la charge**

Les travaux menés dans ce domaine ont surtout concerné l'influence de la dynamique de la charge sur la détection et le diagnostic d'autres défauts tels que la rupture d'une barre ou l'excentricité du rotor. Ces études ont montré que l'introduction de perturbations ou d'oscillations par la charge pouvait masquer l'apparition des défauts du moteur.

Pour maîtriser l'étude des défauts de la charge, une connaissance parfaite de cet élément s'avère nécessaire. Pour ce faire, on peut procéder tout d'abord à une classification des différents types de charge les plus rencontrés:

- Charge à couple constant : le couple n'est pas fonction de la vitesse (Ex : traction, convoyeur, tapis roulant,...).
- Charge à couple variable : le couple varie en fonction de la vitesse (ex : pompe centrifuge, ventilateur,...).

- Charge à puissance constante : tels que les broyeuses, les affûteuses, les bobineurs,.....

La charge peut donc être le siège de mauvaises conditions de fonctionnement qui aboutissent à l'apparition de défauts tels que :

- Surcouples accidentels.
- à-coups de couple accidentels.
- Perturbations mécaniques dues aux vibrations et phénomènes de résonance mécanique liés à la construction de la machine ou introduites par l'environnement extérieur.

Tous ces défauts de la charge vont naturellement avoir une influence dégradante sur les grandeurs mécaniques mises en jeu au niveau de l'entraînement, à savoir le couple électromagnétique et la vitesse de rotation.

#### **1.8.4 Défaillances au stator**

Les défaillances au stator représentent environ de 40 ÷ 60% des défauts des machines à induction [ALL-88]. La majeure partie de défauts statoriques est attribuée à la dégradation d'isolants. L'enroulement statorique d'une machine électrique est soumis à des efforts induits par une variété de facteurs, parmi les plus importants, une surcharge thermique, les vibrations mécaniques, les pics de tension provoqués par le réglage de fréquence, etc. Les causes les plus fréquentes des défauts d'enroulements statoriques sont [IBR-09], [VAS-09], [ESF-14] :

- Vieillesse naturelle des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation normale, l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- Échauffement excessif du noyau et des enroulements du stator.
- Fissures dans la tôle, de fixation, et des jonctions.
- Mauvaise connexion des têtes des enroulements.
- Fonctionnement dans un environnement sévère, contamination provoquée par l'humidité et la saleté.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge.
- Décharges électriques.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Fuites dans les systèmes de refroidissement.

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit: défaut d'isolant, court-circuit entre spires, court-circuit entre phases, court-circuit entre phase et armature, déséquilibre d'alimentation, défaut de circuit magnétique.

#### **1.8.4.1 Défauts d'isolant dans un enroulement**

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or, les matériaux d'isolation ont une limite mécanique, de température et de tension. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné.

Lorsque le défaut de l'isolant se crée sur une spire, le courant de défaut circule entre le cuivre de cette spire et la tôle du stator (défaut phase - masse). Il peut aussi circuler entre deux spires d'une même phase si l'isolant qui les sépare est détérioré (défaut entre-spires). Dans le cas des bobinages à deux couches, une même encoche peut contenir des conducteurs de deux phases différentes. La détérioration simultanée et dans une même zone, des isolants de ces deux bobines provoque un contact électrique entre deux spires de deux phases différentes (défaut phase-phase). Ce type de défaut peut aussi exister dans les bobinages à une couche au niveau des têtes de bobines où les conducteurs de deux phases différentes peuvent entrer en contact. La topologie du circuit électrique est ainsi influencée par ces défauts [VAS-09], [ESF-14].

#### **1.8.4.2 Un court-circuit entre spires de la même phase**

Le chauffage excessif provoqué par le court-circuit entre spires est la raison pour laquelle les moteurs tombent en panne presque toujours en quelques minutes, si ce n'est quelques secondes. Ainsi, chaque 10°C additionnel augmente la détérioration de l'enroulement deux fois plus rapidement que dans un fonctionnement à température normale [IBR-09]. Le défaut de court-circuit entre spires de la même phase est assez fréquent dans la machine asynchrone, ce défaut a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie aussi le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique [BON-92], [BOU-13]. Donc, la conséquence est une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant encourager l'apparition d'un 2<sup>ème</sup> court-circuit, alors un défaut en chaîne. Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations de couple liées au déséquilibre des courants de phases engendré par le défaut [VAS-09].

#### **1.8.4.3 Un court-circuit entre phases**

Ce défaut peut arriver en tout point du bobinage, mais les plus fréquents apparaissent dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient [VAS-09]. L'influence de ce type de défaut sur le fonctionnement de la machine dépend de la localisation du défaut (de la partie affectée). Si le court-circuit est proche de l'alimentation entre phases, il induit des courants très élevés qui conduisent à la fusion des conducteurs d'alimentation ce qui provoque un arrêt net de la machine [BOU-13]. Si le court-circuit est proche du neutre entre deux phases, il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de fusion des conducteurs. L'apparition de ce type de défaut dans le cas des machines asynchrones, provoque une augmentation des courants dans les barres ainsi que dans les anneaux du rotor à cage.

#### 1.8.4 Défaillances de circuit magnétique

Les tôles du circuit magnétique sont feuilletées et isolées entre elles, cependant elles peuvent se retrouver court-circuitées. Les causes les plus fréquentes de défaut de circuit magnétique sont généralement liées à un défaut sévère d'excentricité statique et/ou dynamique qui peut conduire à un contact front entre le stator et le rotor ce qui détruit le circuit magnétique, ou bien court-circuit des conducteurs qui peut également provoquer un échauffement local intense dans les tôles, ainsi la projection des corps étrangers dans l'entrefer peut entraîner l'abrasion des tôles et ainsi les court-circuitées [SAH-10].

#### 1.8.5 Défaillances au rotor

Dans les machines asynchrones à cage, les défaillances qui peuvent atteindre le rotor sont considérées comme plus variées et plus complexes que celles affectant le stator. Ceci est particulièrement vérifié pour les machines de faible et moyenne puissances. Plusieurs facteurs manifestent l'apparition des défaillances au niveau du rotor de la machine asynchrone, parmi eux, on cite [VAS-09]:

- Thermique (surcharge, ...).
- Electromagnétique (force en  $B^2(t)$  ...).
- Dynamique (arbre de transmission, ...).

Les défauts qui sont les plus répétitifs, localisés au niveau du rotor sont : l'excentricité statique et dynamique, la rupture de barres rotoriques et la rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.

##### 1.8.5.1 Excentricité

Les effets des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe dès sa fabrication. La présence d'un certain niveau d'excentricité est normale dans les machines électriques. Des fabricants et utilisateurs spécifient un niveau admissible maximum de 5%, tandis que dans d'autres cas, un niveau maximum de 10% de la largeur d'entrefer est toléré [WOL-07].

Par conception, l'entrefer d'une machine asynchrone est considérablement plus petit que dans d'autres types de machines ayant les mêmes grandeurs et performances, la machine asynchrone sera la plus sensible aux excentricités. En outre, Lors du fonctionnement de la machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité [CEB-12]:

- La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine, qui va engendrer une usure des roulements et une amplification du décentrement.
- Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine, en effet, le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor. L'effort radial est maximal à l'endroit où se situe l'épaisseur minimale de l'entrefer et va tendre à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimum et augmenter par conséquent encore plus le déséquilibre des efforts radiaux. Le point extrême de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine.

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées, [WER-12]:

- L'excentricité statique: généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Elle résulte d'un défaut de centrage des flasques et se manifeste même dans des machines fabriquées récemment en raison des méthodes de fabrication et d'assemblage [CEB-12] (voir figure I.7.b).
- L'excentricité dynamique: ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes. Elle correspond au décalage du centre de rotation du rotor par rapport au centre géométrique du stator, avec en plus, une rotation du centre du rotor autour du centre géométrique de ce stator [CEB-12] (voir figure I.7.c).
- L'excentricité mixte: en réalité, les excentricités statiques et dynamiques ont tendance à co-exister, [FAI-09]. Un niveau inhérent d'excentricité statique existe toujours, même dans des machines de fabrication récentes. Cela provoque des efforts réguliers d'attraction magnétique non compensés dans une seule direction [DOR-97], et avec le temps cela peut conduire à la flexion d'un arbre et la dégradation de roulement ..., tout cela entamant une excentricité dynamique. Sans détection précoce, l'excentricité devient suffisamment grande pour développer des forces radiales déséquilibrées qui peuvent créer un frottement entre le stator et le rotor, ce qui mène à une panne très grave de la machine.

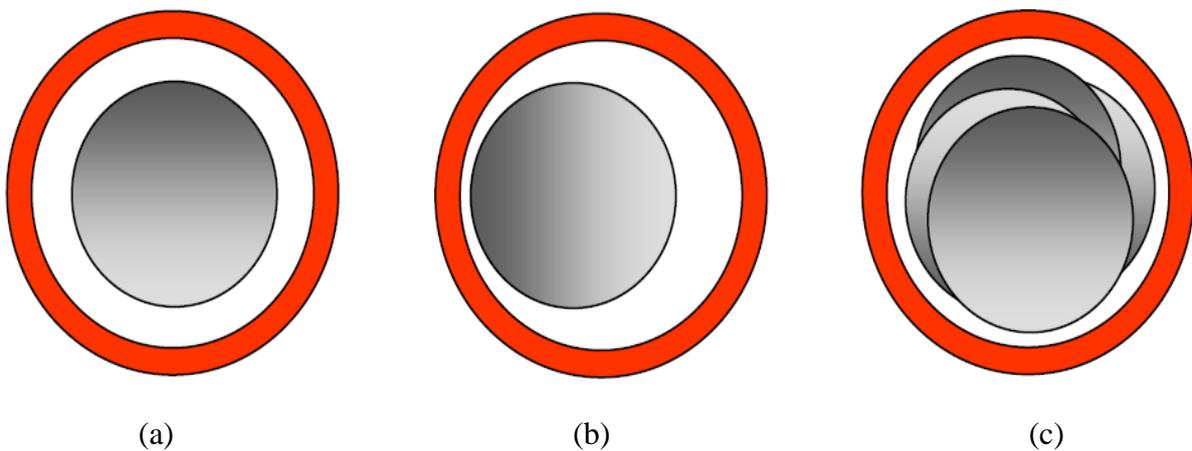


Figure I.9 Types d'excentricité: (a) rotor concentré; (b) excentricité statique; (c) excentricité dynamique

Ce défaut modifie les comportements magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [VAS-09].

### **1.8.5.2 Rupture de barres et d'anneau de court-circuit**

Pour une machine asynchrone à cage d'écureuil, les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit. 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 de court-circuit. Les ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, etc.), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures) [BON-92]. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine [TOL-95], [KAI-14]. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées [FIL-98].

La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres dans une machine asynchrone à cage. Ces cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. Il convient de mentionner, qu'un mauvais dimensionnement des anneaux, conduit à une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge de couple et, donc, à des courants pouvant entraîner leur cassure [VAS-09], [CEB-12].

La rupture d'une portion d'anneau 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 [TOL-95].

### **1.8.6 Les défauts au niveau de l'onduleur [WAL-06]**

On peut distinguer les défauts selon leurs origines en deux parties : au niveau de la machine (statorique comme les courts circuits ou rotorique les excentricités) et au niveau de l'onduleur, les interrupteurs de l'onduleur doivent supporter de grandes variations de température (cycles thermiques). Pour les transistors bipolaires type IGBTs, la disparité entre le coefficient de dilatation thermique et les coefficients du fil en aluminium et de la puce de silicone est la cause d'efforts de cisaillement sur les interfaces de liaison qui peuvent mener à la rupture du fil. Afin de prévoir la durée de vie d'un IGBT, le nombre de cycles thermiques qu'il supporte lors du fonctionnement doit être correctement déterminé. Indépendamment des commutateurs d'inverseur, le condensateur C est une pièce importante de l'onduleur et devrait être pris en considération en estimant la fiabilité de l'onduleur. Afin d'améliorer la fiabilité de l'onduleur, les IGBTs et les diodes correspondantes ainsi que les commandes de porte (et les circuits additionnels de commande) peuvent être fusionnés dans un module unique de puissance. De tels modules de puissance sont souvent désignés sous le nom de modules intelligents de puissance (IPMs). Les circuits additionnels de commande peuvent fournir des fonctions de protection contre la surchauffe, le court-circuit, ...etc.

### 1.8.6.1 Les schémas des défauts au niveau de l'onduleur

On peut présenter les différents d'un onduleur par les schémas suivants :

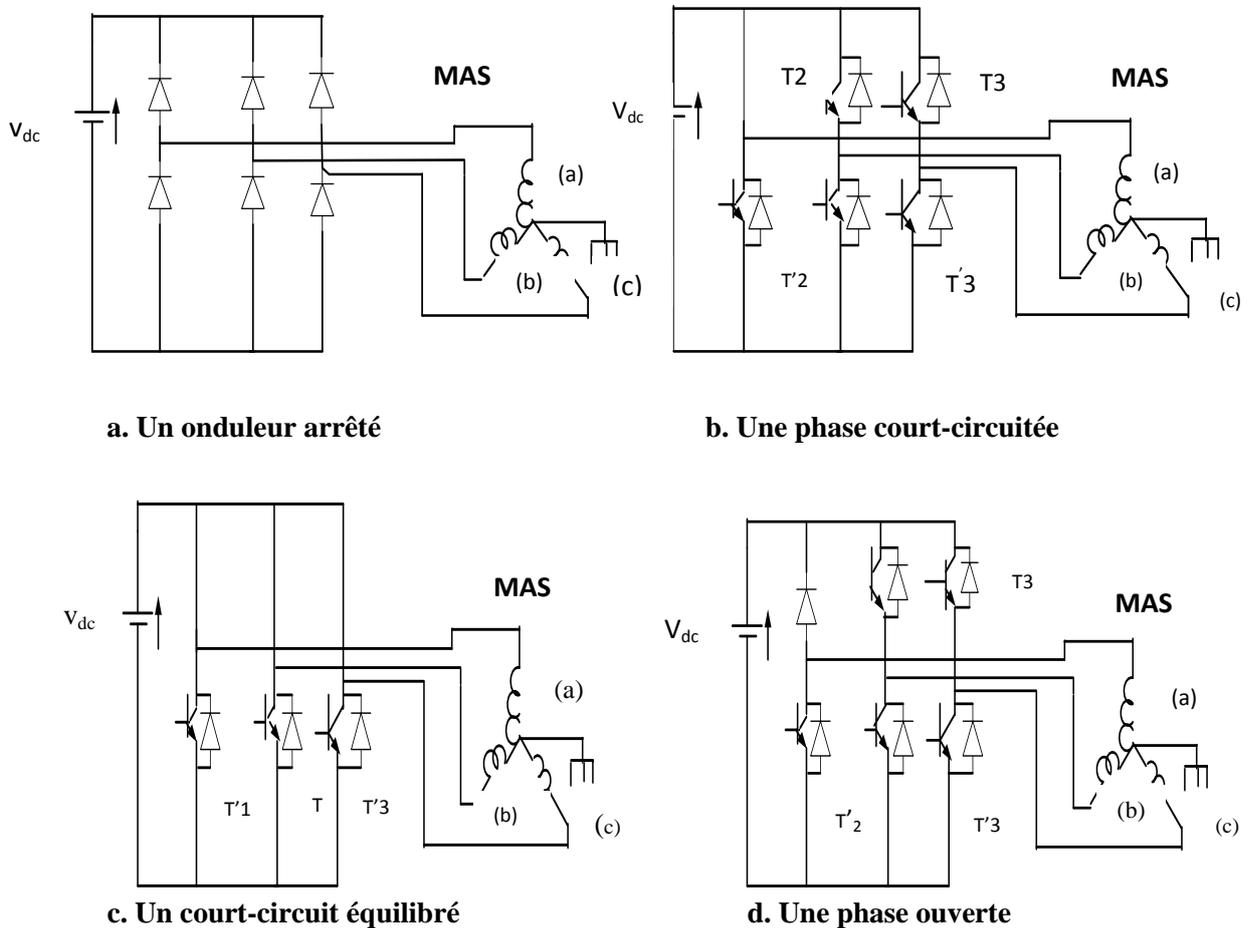


Figure I.10 Schémas des défauts au niveau de l'onduleur

## 1.9 Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone

Plusieurs études statistiques ont été menées dans le but de quantifier l'impact de chaque type de défaut sur la fiabilité de la machine et leurs pourcentages ont été cités dans plusieurs publications. Les résultats obtenus restent quand même assez différents d'une étude à l'autre. Cependant, toutes les études convergent pour classer les défauts de paliers comme étant les plus fréquents, suivis par les défauts statoriques et, en dernier, les défauts de cage rotorique.

La figure I.11 présente les phénomènes à l'origine des défauts dans la machine : la principale source de défauts provient de la mécanique; la deuxième cause de défauts est la surchauffe du moteur qui accentue le vieillissement des composants; la troisième cause de défauts référencés est le claquage d'isolants conduisant à des courts-circuits.

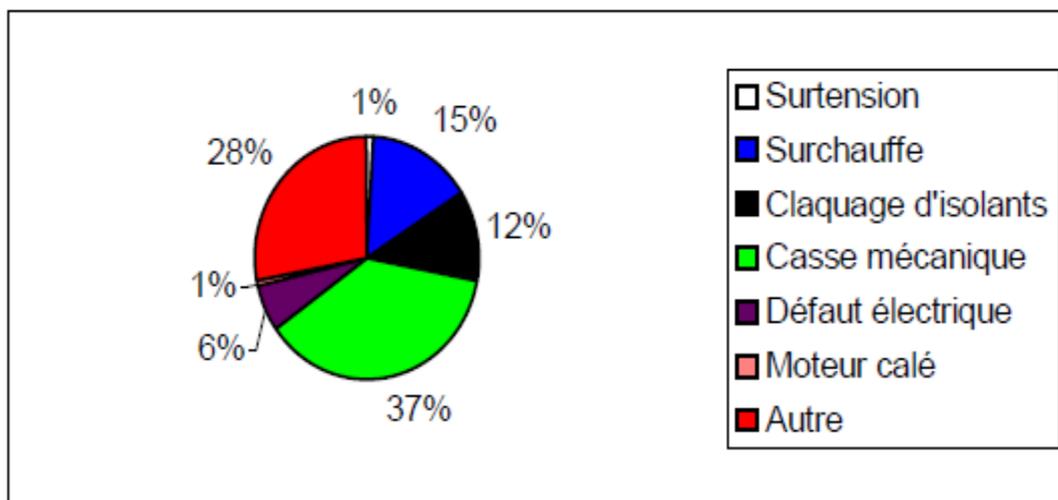


Figure I.11 Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone

La figure I.12 précise les conditions qui aggravent le défaut: la première source d'aggravation provient de l'usure des éléments avec l'âge et la durée de service. Cette usure est renforcée par les différentes conditions de fonctionnement (surchauffe, humidité, exposition,...).

En règle générale, toute différence par rapport au point de fonctionnement nominal contribue à aggraver le défaut naissant voir à le faciliter.

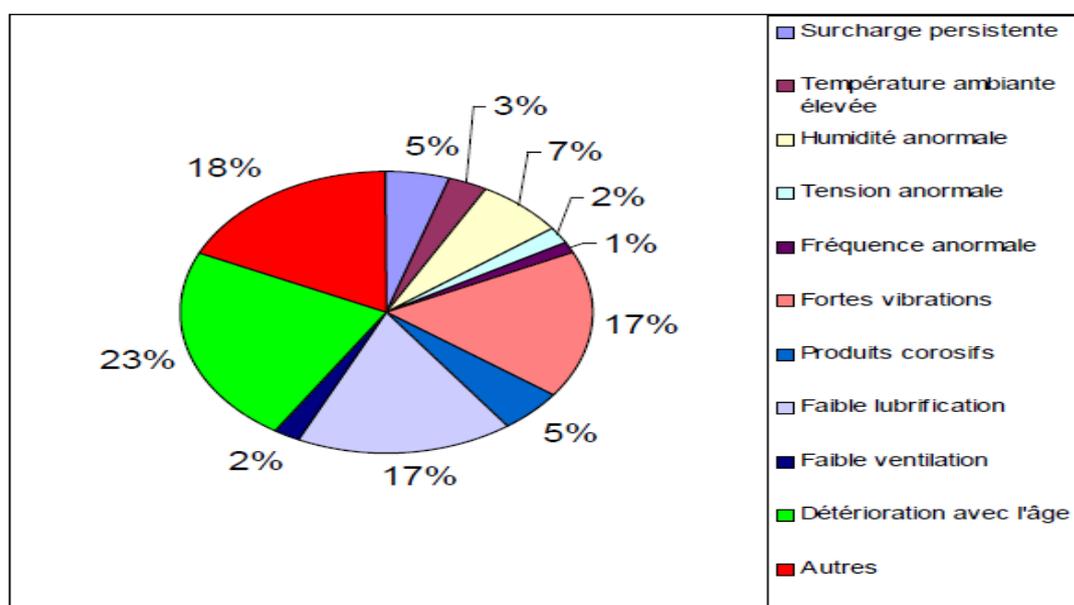


Figure I.12 Facteurs aggravants le défaut

Une étude conduite pour IEEE [IEE-85] a établi une statistique des différents défauts pouvant se produire sur une machine électrique (figure I.13).

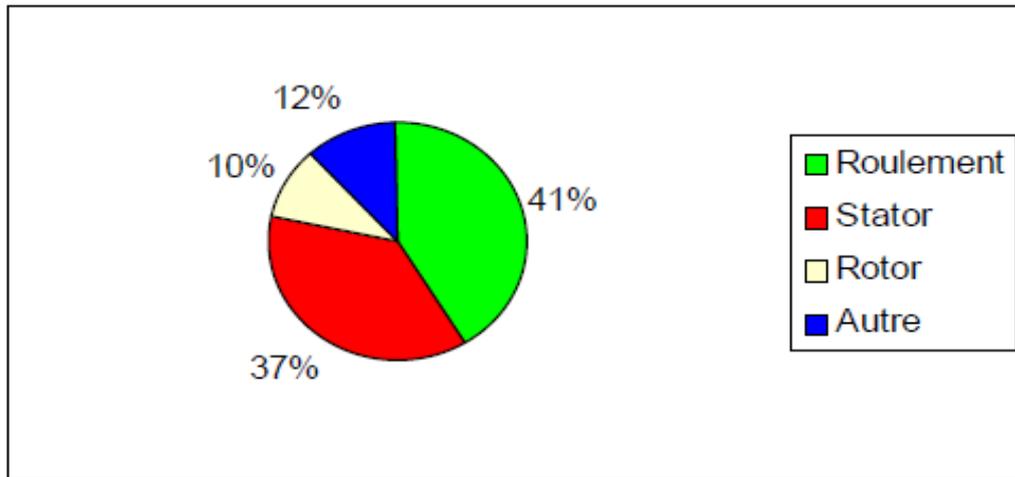


Figure I.13 Répartition des défauts [IEE-85]

### 1.9.1 Défauts statoriques

La majeure partie des défauts au stator des machines asynchrones est due à des défauts d'isolement (Figure I.14)

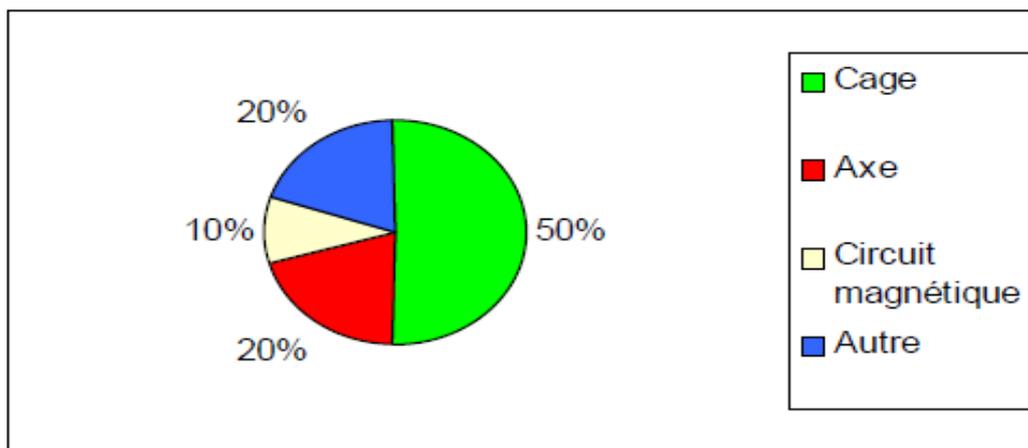


Figure I.14 Répartition des défauts statoriques

A signaler que ces statistiques ne sont pas détaillées par type de branches industrielles; par conséquent, elles peuvent avoir des significations différentes selon qu'on parle d'industries. Comme nous ne sommes intéressés que par deux types de défaut, à savoir le défaut statorique et le défaut rotorique.

### 1.9.2 Défauts rotoriques

La majorité des défauts au rotor ont trait à la cage. La seconde source de défauts provient d'une déformation de l'axe du rotor (figure I.15).

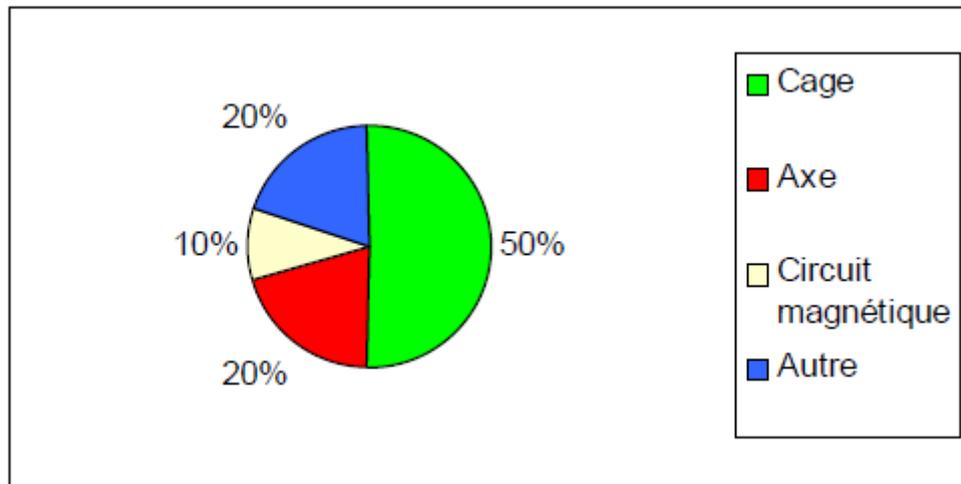


Figure I.15 Répartition des défauts rotoriques [BER-00]

Ces deux défauts ont pour origine des contraintes de fonctionnement trop fortes sur la cage qui provoquent sa déformation. Ces défauts s'expliquent par les méthodes employées auparavant pour la construction de la cage; la part de celle-ci dans les défauts rotor et les défauts rotor eux-mêmes ont diminué.

### 1.10 Recherche indispensable des symptômes

Lorsque plusieurs défauts présentent les mêmes symptômes, il devient indispensable, pour l'opérateur, de rechercher systématiquement l'existence des symptômes en plus. Il faut insister d'emblée sur le fait que certains de ces symptômes ne sont pas spécifiques à un défaut en particulier et c'est l'analyse minutieuse qui doit faire montrer cela.

Le médecin, pour faire un diagnostic réussi, fait plusieurs tests à la recherche de nouveaux symptômes, car ceux signalés par le système nerveux central le guident vers plusieurs causes, particulièrement si la maladie s'est aggravée avec le temps, dans ces cas, c'est l'analyse différentielle associée aux résultats des tests qui permettra de rattacher ces symptômes à l'un ou à l'autre des causes probables, à partir de là, on conclut que :

Le diagnostic est facile lorsqu'il est fait en temps réel et lorsque les symptômes sont clairs. Le tableau (Tab.I.1) indique quelques modes de pannes typiques observées sur le moteur.

Symptômes	Causes probables
-Intensité réduite, Vitesse élevée et Température réduite.	- Diminution de la charge.
-Température exagérée.	- Ventilation incorrecte.
-Intensité élevée, Vitesse réduite et Température élevée.	- Surcharge.
-Intensité exagérée, Vitesse très réduite et Température exagérée.	- Blocage de rotor ; - Mauvais branchement ; - Moteur chauffé.
- Vitesse réduite.	- Moteur faible.
- Intensité de l'une des phases est exagérée et Température exagérée ; ou - Intensité de deux phases est exagérée et Température exagérée ; ou - Intensité de l'une des phases est exagérée, Température exagérée et Vitesse réduite ; ou - Intensités de deux phases sont exagérées, Température exagérée et Vitesse réduite.	-Court circuit entre spires.
- Intensité d'une phase est nulle.	- Rupture d'une phase du stator ; - Phase non alimentée.
- Intensités de deux phases sont nulles.	- les deux phases non alimentées.

Tab.I.1 Pannes types observées sur un moteur

## 1.11 Conclusion

Ce premier chapitre est essentiellement consacré à l'état de l'art de la machine asynchrone et sur le diagnostic. Nous avons scindé ce chapitre en deux parties : la première concerne la constitution de la machine asynchrone; la deuxième partie traite les défaillances qui peuvent intervenir dans un ensemble électrique tournant.

Il est important de souligner que les défauts rotoriques sont les plus fréquents particulièrement dans les machines de moyenne puissance et ils peuvent être la cause de défauts sur les autres parties de la machine et ainsi entraîner un dysfonctionnement plus grave dans la machine.

## Chapitre 2

---

### **Les méthodes de diagnostic dans la machine asynchrone**

---

## 2.1 Introduction

La maintenance nécessite de connaître les régimes de fonctionnement des systèmes alors que la surveillance donne une réponse aux besoins d'information de la maintenance dans le but de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic s'intègre à la surveillance en ayant pour objectif de déterminer les causes de dysfonctionnement.

La surveillance et le diagnostic des défauts nécessitent d'obtenir des symptômes caractéristiques du fonctionnement de l'entraînement surveillé et de les analyser pour en déduire l'état du système. L'établissement des symptômes se fait souvent en référence à la connaissance du comportement sain dont on dispose.

La forme et la méthode de génération des symptômes sont tributaires de la forme prise par cette connaissance. Par exemple si le fonctionnement défaillant est mis en évidence par l'apparition des nouvelles raies spectrales dans une grandeur électrique, une analyse en traitement de signal permettra une acquisition des symptômes. Le mode de traitement des symptômes dépend de leur type mais aussi de la forme prise de la connaissance.

Traditionnellement, les symptômes du défaut sont recherchés dans les signaux mesurés: ce sont les méthodes reposant sur une approche signal. Elles traitent en grande partie des informations issues de l'expérience. Les méthodes de surveillance et de diagnostic mises en œuvre s'orientent donc naturellement sur l'analyse du signal (sans ajout de capteur).

Une autre approche, appelée « système » basée sur des méthodes heuristiques, issues de l'expérience et de l'expertise. Des techniques d'aide à la génération et la formalisation des symptômes (mesures) ont permis de fournir une aide à l'expertise en quantifiant les symptômes (analyse de signaux électrique, vibratoire, thermique) mais l'analyse reste une affaire de règles et de classification (reconnaissance de forme, système expert..). Ces méthodes de surveillance nécessitent une bonne connaissance du système et de ces composants.

## 2.2 Caractéristiques souhaitables d'un système de diagnostic

Afin de pouvoir comparer diverses approches de diagnostic, il est utile d'identifier un ensemble de caractéristiques souhaitables qu'un système de diagnostic devrait posséder. Bien que ces caractéristiques ne soient habituellement possédées par aucune méthode de diagnostic particulière, elles sont utiles pour évaluer diverses méthodes en termes d'information à priori qui doit être fournie, de rapidité, de robustesse, d'adaptabilité, etc. Chaque fois qu'une anomalie se produit dans un procédé, un système de diagnostic fournit un ensemble d'hypothèses de défauts qui explique les observations. L'efficacité d'un système de diagnostic demande que le défaut réel soit un sous-ensemble de l'ensemble des défauts suspectés. La résolution d'un système de diagnostic demande que l'ensemble des défauts fournis soit aussi minimal que possible. Les paragraphes suivants présentent un ensemble de caractéristiques souhaitables qu'un système de diagnostic doit posséder.

### **2.2.1 Rapidité et sensibilité de détection**

Un système de diagnostic devrait répondre rapidement en détectant et en diagnostiquant les mauvais fonctionnements du procédé. Cependant, les réponses rapides du diagnostic et les performances tolérables durant un fonctionnement normal sont deux buts différents. Un système qui est conçu pour détecter un défaut rapidement sera sensible aux influences de toutes les erreurs (bruit, incertitudes...). Ceci rend le système sensible au bruit et peut déclencher fréquemment des fausses alarmes pendant un fonctionnement normal.

### **2.2.2 Robustesse**

On voudrait que le système de diagnostic soit robuste aux divers bruits et incertitudes. On voudrait que ses performances se dégradent lentement au lieu d'échouer totalement et abruptement. La robustesse est incompatible avec les systèmes très sensibles aux seuils. En présence du bruit, ces seuils doivent être choisis raisonnablement. Ainsi, les besoins de robustesse doivent être équilibrés avec ceux de sensibilité.

### **2.2.3 Identification de nouveaux défauts**

Une des fonctionnalités minimales qu'un système de diagnostic doit posséder, est de pouvoir décider, étant donné des conditions courantes de fonctionnement, si le procédé fonctionne normalement ou anormalement, et s'il est anormal, si la cause est un défaut de fonctionnement connu ou un inconnu. Ce critère est connu comme identification de nouveauté (nouveaux événements). En général, on dispose de données suffisantes pour décrire le comportement normal du procédé. Cependant, typiquement on n'a pas de tels historiques de données disponibles pour modéliser les modes de fonctionnement anormaux d'une manière satisfaisante. Seuls quelques gabarits de données peuvent être disponibles pour couvrir une partie du fonctionnement anormal. Ainsi, il est possible qu'une grande partie de la région de dysfonctionnement ne puisse avoir été modélisée. Ceci posera des défis sérieux pour l'identification de nouvelles situations. Même dans ces conditions difficiles, on voudrait que le système de diagnostic puisse identifier l'occurrence des nouveaux défauts et ne les classifie pas comme d'autres défauts de fonctionnement connus ou comme fonctionnement normal.

### **2.2.4 La localisation**

La localisation est la capacité du système de diagnostic à distinguer entre différents défauts. Dans des conditions idéales exemptes de bruit et d'incertitudes de modélisation, ceci revient à dire que le système de diagnostic devrait pouvoir générer un ensemble d'hypothèses qui ne contient pas les défauts absents. Naturellement la capacité de concevoir de tels systèmes dépend en grande partie de la connaissance de la structure et des caractéristiques du procédé.

### **2.2.5 Adaptabilité**

En général les procédés évoluent en raison des changements des entrées externes ou des changements structurels. Les conditions de fonctionnement du procédé peuvent changer non seulement en raison des perturbations mais également en raison des changements des conditions environnementales telles que les changements des quantités de production avec des

demandes variantes, des changements de qualité de matière première, etc. Ainsi le système de diagnostic devrait être adaptable aux changements. Il devrait être possible de développer graduellement la portée du système pendant que les nouvelles situations émergent grâce à la disponibilité d'informations supplémentaires.

### **2.2.6 Identification des défauts multiple**

La capacité d'identifier les défauts multiples est un objectif important, mais difficile, à cause de l'influence simultanée de la plupart des défauts. Dans un système non linéaire général, des interactions se manifestent, et par conséquent un système de diagnostic ne peut pas employer les différents modèles de chaque défaut pour modéliser l'effet combiné des défauts. Par ailleurs, l'énumération des différentes combinaisons de défauts multiples et l'analyse de leurs effets deviennent combinatoires pour des procédés de grande échelle.

### **2.2.7 Estimation d'erreur de classification**

Une condition pratique importante pour un système de diagnostic, est l'établissement des niveaux de confiance. Ceci pourrait être considérablement facilité si le système de diagnostic pouvait fournir une évaluation a priori sur l'erreur de classification qui peut se produire. De telles mesures d'erreur seraient utiles pour projeter des niveaux de confiance sur les décisions produites par le système donnant à l'utilisateur une meilleure sensation à propos de la fiabilité des recommandations proposées par le système de diagnostic.

### **2.2.8 Facilité d'explication**

En dehors de la capacité d'identifier la source d'un défaut de fonctionnement, un système de diagnostic devrait également fournir des explications sur la façon dont le défaut a commencé et a évolué vers la situation actuelle. C'est un facteur très important lorsque l'on conçoit des systèmes interactifs d'aide à la décision en ligne. Ceci exige la capacité de raisonner au sujet de la cause et des effets dans un procédé. Un système de diagnostic doit justifier ses recommandations de sorte que l'opérateur puisse en conséquence évaluer et agir en utilisant son expérience. On voudrait que le système de diagnostic justifie non seulement pourquoi certaines hypothèses ont été proposées, mais expliquer également pourquoi certaines autres hypothèses n'ont pas été proposées.

## **2.3 Transformation des mesures dans un système de diagnostic**

Généralement, le processus de diagnostic peut être défini comme un processus décisionnel. La décision finale est constituée de l'ensemble des défauts possibles. La figure II.1, montre les diverses transformations que les données du procédé subissent pendant le processus de diagnostic.

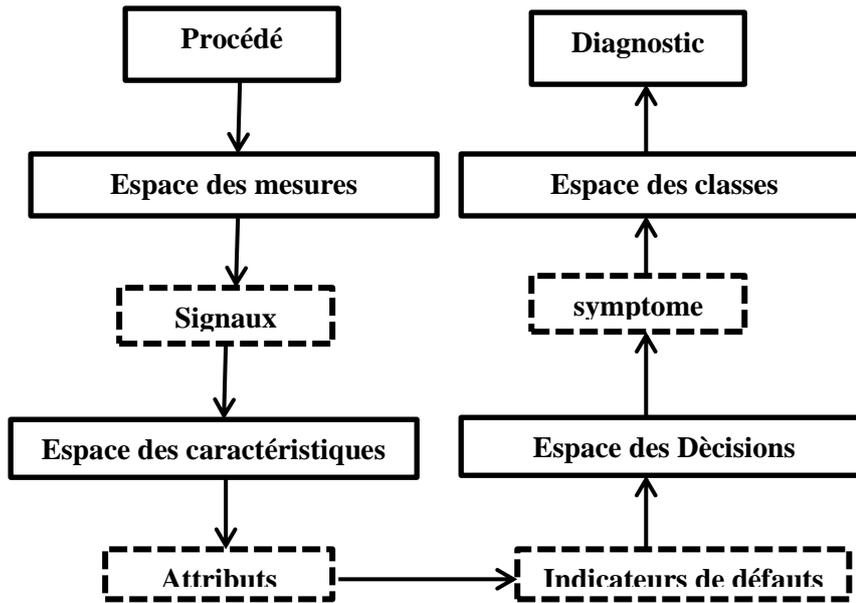


Figure II.1 Transformations de mesures dans un système de diagnostic

**L'espace des mesures** est défini par les sorties du système, ces sorties peuvent avoir subi des prétraitements (élimination de données aberrantes, filtrage,...). Ce sont les entrées du système de diagnostic.

**L'espace des caractéristiques** est l'espace obtenu en fonction des mesures en utilisant une connaissance a priori du problème. Ici, les mesures sont analysées et combinées à l'aide d'une connaissance a priori du procédé pour extraire les caractéristiques utiles concernant le comportement du procédé, pour faciliter le diagnostic. Il y a deux manières de développer l'espace des caractéristiques à partir de l'espace des mesures, à savoir, la sélection et l'extraction des caractéristiques. L'extraction de caractéristiques est un procédé qui facilite, par l'utilisation de la connaissance antérieure du problème, une transformation de l'espace de mesure dans un espace de dimension inférieure.

**Le passage de l'espace des caractéristiques à l'espace des décisions** est habituellement fait pour satisfaire une certaine fonction objective (telle que réduire au minimum la non détection). Cette transformation est réalisée en employant une fonction discriminante, dans certains cas en employant des fonctions simples de seuil.

**L'espace des décisions** est l'espace correspondant au nombre de variables de décision obtenu par des transformations appropriées de l'espace des caractéristiques.

**L'espace des classes** correspond au nombre de classes de défaut. En classant les défauts, nous indiquons catégoriquement à quelle classe un défaut appartient. L'espace des classes est ainsi l'interprétation finale du système de diagnostic fourni à l'utilisateur.

## 2.4 Classification des méthodes de diagnostic

Compte tenu de l'importance des enjeux en termes de productivité (arrêt inutile des installations), de sécurité (anomalie non détectée) ou de qualité de production (mesure incorrecte d'une grandeur à contrôler), de nombreuses approches ont été utilisées pour apporter une contribution à la solution du problème de diagnostic. On distingue cependant, parmi les différentes méthodes, deux familles principales ; celles qui utilisent un modèle du système à surveiller, et utilisent généralement les techniques de l'automatique ; et celles pour qui seules les données acquises sur le procédé considéré, qui se limitent à son observation passée et présente, permettent de caractériser son mode de fonctionnement. Parmi les méthodes basées sur l'utilisation d'un modèle du procédé, deux sous-familles importantes peuvent également être dégagées ; celles utilisant un modèle qualitatif et celles recourant à un modèle quantitatif (dit aussi modèle numérique). Pour certaines méthodes, cette distinction est cependant sans fondement, car elles utilisent de manière mixte les deux types de modèles en essayant de tirer profit des avantages et s'affranchir des limitations de chacun d'entre eux. Toutes les méthodes nécessitent une phase d'apprentissage qui permet de connaître une référence de fonctionnement normal ou dégradé. Cette référence permet de générer en temps réel les symptômes lors de la phase de diagnostic. Les sections suivantes présentent les grandes familles de méthodes de diagnostic représentées par la Figure II.2.

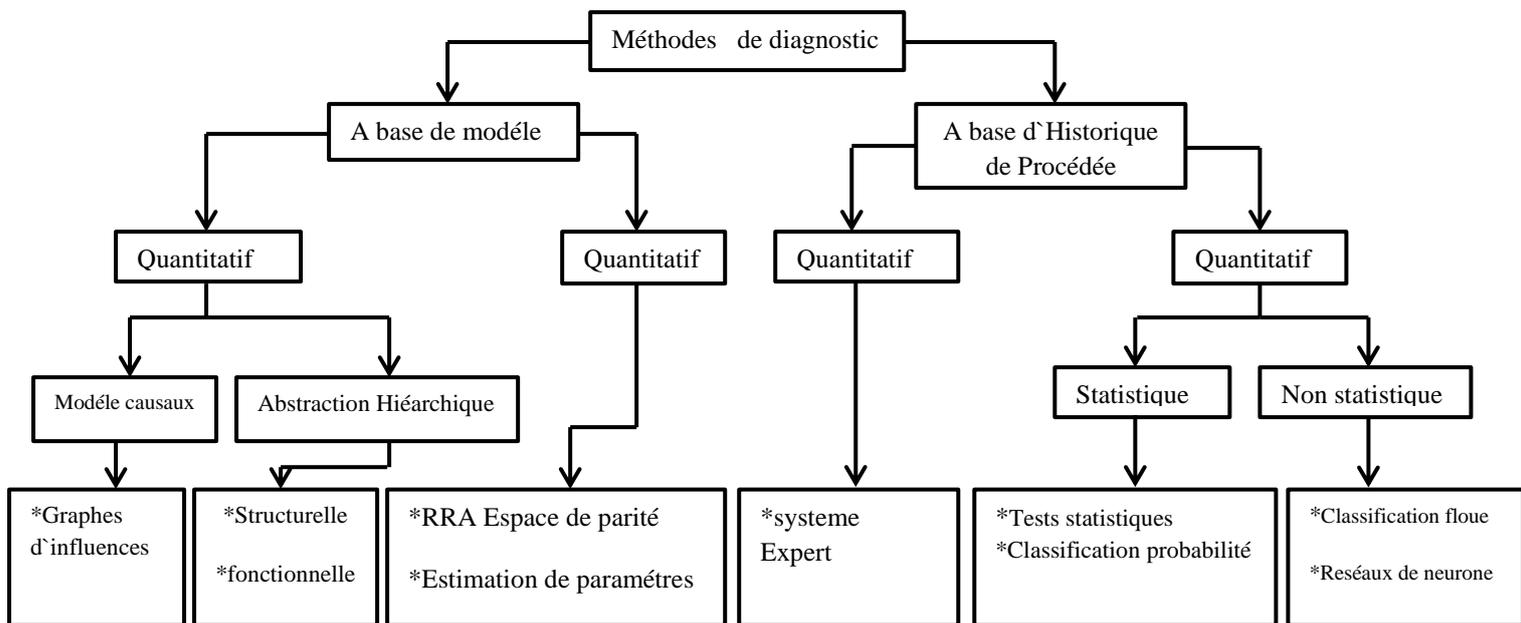


Figure II.2 Les méthodes de diagnostic

### 2.4.1 Approche à base de modèle qualitatif

C'est une connaissance qui s'exprime avec des symboles et peut être traitée, en simulant la façon dont un humain raisonne logiquement, par des techniques informatiques relevant de l'intelligence artificielle. Pour construire des représentations qui permettent une meilleure

compréhension des phénomènes physiques mis en jeu dans un procédé, l'intelligence artificielle s'intéresse au milieu des années 1980 au raisonnement qualitatif. Le développement de techniques de représentation qualitative du monde pour en comprendre schématiquement le fonctionnement est une idée très naturelle et par conséquent très ancienne. On trouve dans la proche qualitative (Modèles causaux, Abstractions hiérarchiques).

### 2.4.2 Approche à base de modèle quantitatif

L'utilisation de modèle mathématique pour le diagnostic est très largement répandue. Les méthodes de surveillance à base de modèle (Model-based-FDI: Fault Detection and Isolation) utilisent un modèle et reposent sur la génération et l'étude d'un signal particulier appelé "indicateur de défaut" ou "résidu".

**Un résidu** est un signal qui reflète la cohérence des données mesurées vis-à-vis d'un modèle comportemental du système. Les modèles utilisés peuvent être de nature et de complexité différente. Ils peuvent être : à temps continu ou à temps discret, linéaires ou non linéaires, représentant le bon fonctionnement ou tenant compte des défaillances. Les sorties du modèle se représentent classiquement sous la forme de valeurs numériques.

**La localisation** qui suit la détection peut être effectuée à l'aide d'une table de signature ou matrice d'incidence. Les colonnes de cette table sont représentatives des différents défauts et les lignes des différents résidus. Un 1 représente le symptôme qui indique que le résidu est sensible au défaut, un 0 le contraire. La signature d'un défaut (colonne de la matrice) définit l'état des symptômes lorsque ce défaut affecte le système (l'état est une grandeur logique ou symbolique).

**En surveillance**, par contre, il est parfois nécessaire de compléter le modèle afin de caractériser le comportement défaillant du système. Suivant la classe de modèle considérée, les techniques de génération de résidus seront différentes. Suivant le niveau de connaissance sur les défaillances, les résultats de la procédure de surveillance seront plus ou moins précis et complets.

### 2.4.3 Approche à base d'extraction de caractéristiques qualitatives

Ces méthodes ont l'avantage de ne pas nécessiter la connaissance d'un modèle mathématique ou structurel du procédé, contrairement aux méthodes à base de modèles. Seulement, la disponibilité de grandes quantités de données historiques du procédé est nécessaire. Il y a diverses façons de traiter ces données et de les présenter en tant que connaissance a priori pour le diagnostic. Ceci est connu comme l'extraction de caractéristiques. Parmi les méthodes d'extraction de caractéristiques qualitatives, se trouvent les méthodes à base de règles (systèmes experts), et les méthodes de représentation et analyse qualitative des tendances.

### 2.4.4 Approche à base d'extraction de caractéristiques quantitatives

Dans la section précédente, on a vu la méthode basée sur l'extraction de caractéristiques qualitatives. Dans cette section, on va évoquer la méthode qui extrait les caractéristiques quantitatives. On peut analyser les signaux issus de l'instrumentation et proposer pour chacun de ces signaux un modèle.

### 2.4.4.1 La méthode statistique

Comme tests d'hypothèses, classification probabilistes, analyse en composante principale, moindres carrés partiels, cette méthode est, en fait, une référence du comportement d'un signal, qui peut être représentative de l'état normal de l'installation ou d'un défaut particulier.

### 2.4.4.2 Les méthodes non statistiques

On peut citer la classification floue, réseaux de neurones, méthodes de signature, méthodes fréquentielles, temps-fréquence et temps-échelle. La méthode non statistique est une autre méthode de représentation pour un signal qui peut très bien être utilisée comme référence pour le diagnostic, est sa représentation par un spectre de fréquences, une signature graphique, ou encore l'extraction d'attributs (ou caractéristiques), à partir des données suivie de leur classification, qui permettent, pour des procédés dont on veut analyser plusieurs signaux liés entre eux, de discriminer divers modes de fonctionnement, dont le mode normal et certains modes de défaillance.

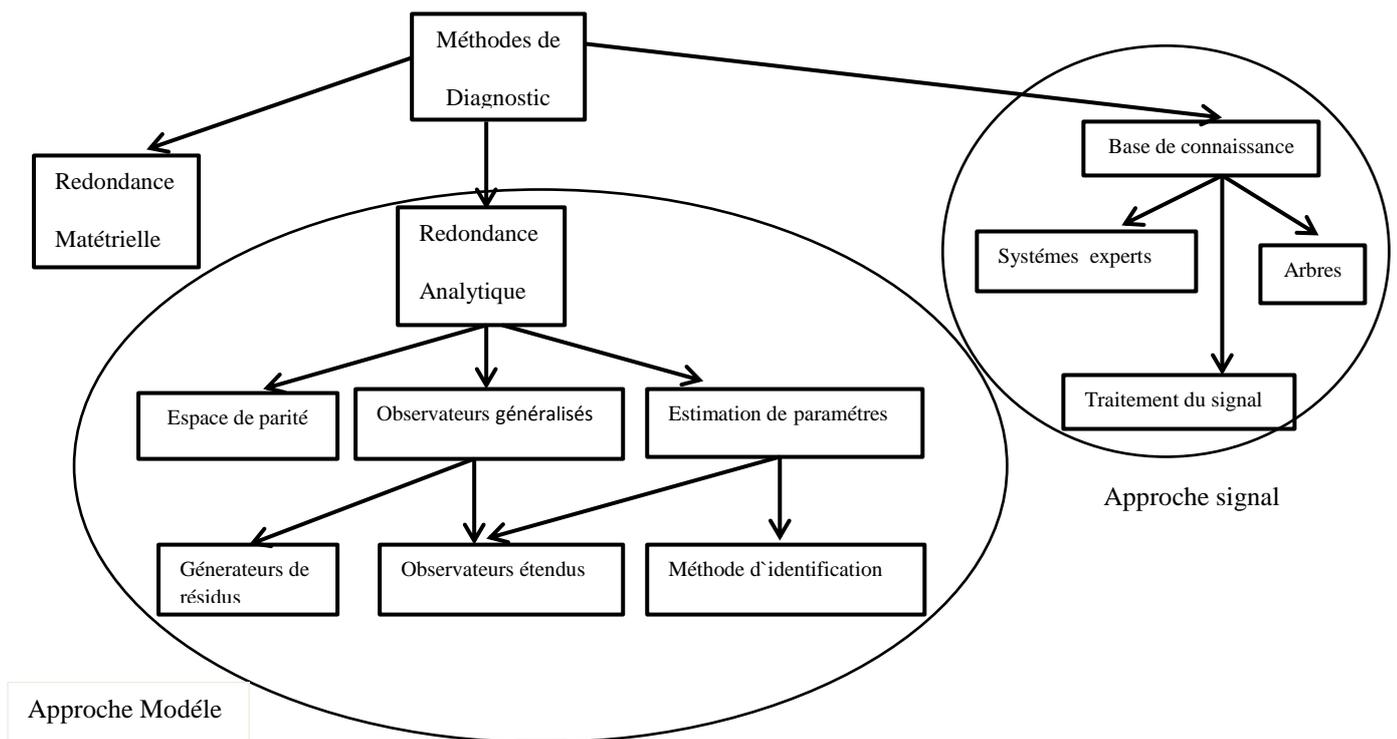


Figure II.3 Les différentes méthodes de diagnostic

## 2.5 Méthodes basées sur une approche système

Plusieurs méthodes ont été développées dans la littérature basée sur les réseaux de neurones [RAI-00], la reconnaissance de formes (RDF), [OND-06], le neuro-floue, les algorithmes génétiques [DER-00], les représentations temps fréquence (RTF). Toutes ces méthodes tendent à automatiser le processus de diagnostic depuis l'acquisition des données sur

la machine jusqu'à la prise de décision sans l'intervention d'un expert. Dans cette partie, nous allons présenter quelques unes de ces techniques ainsi que leur application dans le domaine du diagnostic de la machine électrique.

### 2.5.1 Réseaux de neurones

Le principe des réseaux de neurones s'inspire des neurones biologiques. Le modèle du neurone formel se comporte comme un opérateur effectuant une somme pondérée de ses entrées, suivie d'une non linéarité, appelée fonction d'activation, responsable du comportement du neurone. Un réseau de neurones comprend un certain nombre de couches de neurones interconnectés. Couches d'entrées, couches cachées et couches de sortie. L'entrée représentée par les nœuds de sources fournit des poids d'accès physiques pour l'application des signaux d'entrées. Les neurones dans la couche cachée, se comportent en détecteurs de caractéristique, tandis que, les neurones dans la couche de sortie présentent à l'utilisateur les conclusions obtenues par le réseau, ou la réponse aux signaux d'entrées (figure II.4). Une loi d'apprentissage permet d'ajuster les poids des connexions afin d'avoir les performances désirées.

L'initialisation du réseau de neurones est un processus itératif d'ajustement des poids et des biais de manière à minimiser un critère d'erreur. Elle constitue la phase d'apprentissage.

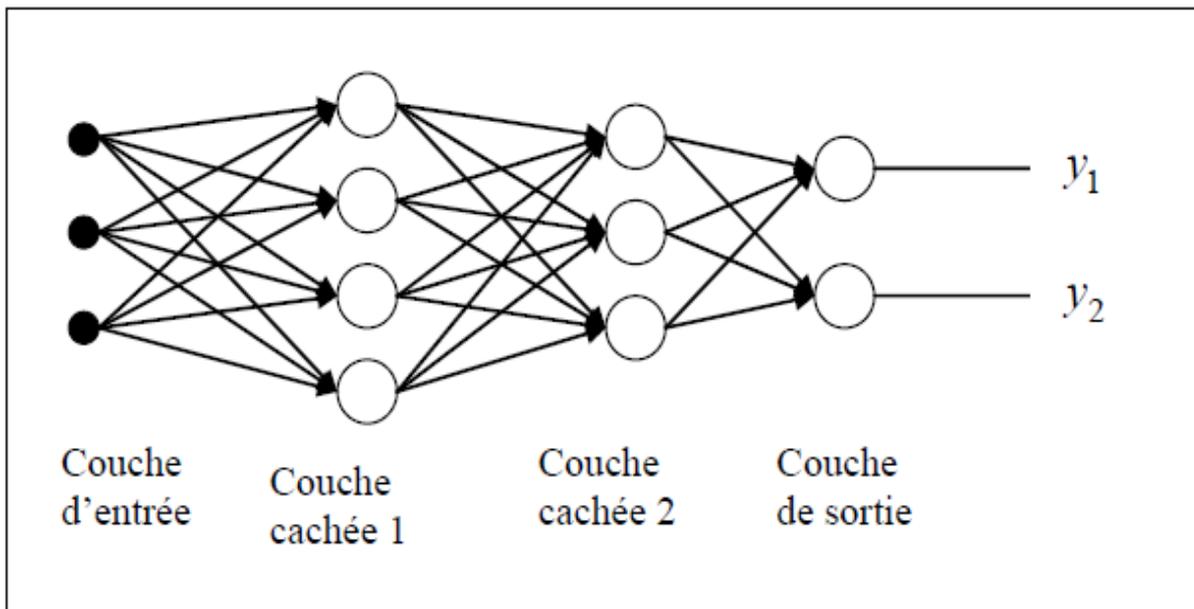


Figure II.4 La structure générale de réseau de neurones

Les avantages des réseaux de neurones :

- La rapidité, très utile lorsque le diagnostic doit être conduit en ligne.
- Un réseau de neurones est robuste surtout vis-à-vis du bruit.

Toutefois un réseau de neurone présente des inconvénients [RAI-00] :

- \* L'apprentissage peut être lent et difficile.

- \* L'apprentissage est gourmand en temps de calcul. Par ailleurs, il doit être réalisé sur toutes les données à la fois, avec le risque que le réseau oublie les résultats précédents.
- \* Il est nécessaire de posséder des jeux de données sur toutes les conditions de fonctionnement et en particulier pour les fonctionnements défectueux.
- \* Un réseau de neurones ne fonctionnera pas forcément correctement hors de sa plage d'apprentissage.
- \* Une fois entraîné, un réseau de neurones n'est pas flexible. Si de nouvelles données interviennent, il faudra recourir à un nouvel apprentissage. Cependant celui-ci peut être effectué en ligne.

L'intérêt des réseaux de neurones dans le domaine de diagnostic se résume en deux points :

- \* Le premier point est la faculté de réseau de neurones d'être utilisé en tant que règle de décision dans un processus d'automatisation de l'opération du diagnostic.
- \* Le second point est la faculté d'apprentissage et de mémorisation d'un grand volume d'information.

### **2.5.2 Reconnaissance de forme (RdF)**

La Reconnaissance des formes (RdF) repose sur le classement des objets ou formes en les comparant à des formes-types. De manière générale, deux types de RdF se distinguent :

- \* La RdF structurelle qui se base sur une représentation des formes à l'aide de grammaires [FU-74]. Cette approche ne sera pas développée par la suite.
- \* La RdF statistique qui s'appuie sur une représentation numérique des formes [DUB- 90].

L'auteur [CAS-03] a appliqué la RdF, pour le diagnostic des défauts de la machine asynchrone. Un vecteur de paramètres, appelé vecteur forme, a été extrait de chacune des mesures effectuées sur la machine. Les règles de décisions utilisées ont permis de classer les observations décrites par le vecteur forme, par rapport aux différents modes de fonctionnement connus avec ou sans défaut. Cette approche permet une classification avec un taux d'erreur presque nul. Toutefois les performances de cette méthode sont liées au choix du vecteur forme. [OND-06] propose une méthode de sélection des paramètres basée sur un algorithme génétique. Il permet une réduction notable de la dimension de ce vecteur sans perte sensible d'information.

L'approche RdF est une méthode bien adaptée au domaine du diagnostic des défauts. Elle requiert une phase d'apprentissage qui peut être non supervisée. Mais ces méthodes requièrent des volumes de calcul importants, parfois incompatibles avec une exploitation temps réel.

Nous avons fait évoluer ces méthodes de classification dans un souci de réduction du temps de calcul et d'efficacité. Nous avons contribué au développement d'une nouvelle approche, système, exploitant une représentation Temps-fréquence et un critère de décision.

Cette méthode est souple, facile à mettre en œuvre. Elle se base uniquement sur le traitement du courant de phase statorique. Par conséquent, cette méthode se prête bien pour un diagnostic en ligne.

### 2.5.3 Méthodes de Coalescence (Clustering)

Ces algorithmes ont comme paramètres d'entrée le nombre de classes. Ils partagent l'ensemble de  $N$  objets en  $K$ -groupes. Ainsi, la similarité à l'intérieur d'un même groupe est élevée, mais faible entre les différentes classes. Pour ce faire, ces algorithmes itèrent en deux étapes. D'abord, ils calculent les centres des groupes et deuxièmement, ils assignent chaque objet au centre le plus proche.

Chaque classe est caractérisée par le centre ou prototype et par ses éléments. Le prototype des classes est le point dans l'espace de dimension  $d$  ( $d$  correspond au nombre de descripteurs) où la somme des distances à tous les objets d'un même groupe est minimale.

*K-Moyen* est, sans aucun doute, l'algorithme le plus connu, parmi les différentes méthodes basées sur la distance. Il effectue une séparation stricte de l'espace (c'est-à-dire, chaque objet n'est associé qu'à une seule classe). La mesure de similarité utilisée est la distance. Pour le calcul, plusieurs mesures peuvent être utilisées (la distance euclidienne, Mahalanobis, ... etc.). Par conséquent, la forme géométrique change en fonction de la mesure employée (pour le cas euclidien, la géométrie des groupes est une hypersphère) [GEN-07].

Le *k-Moyen flou "FKM"* permet d'avoir un regroupement de type flou. Le FKM est un processus itératif qui permet d'obtenir comme résultat la matrice de partition floue ( $U = [u_{kn}]$ ) laquelle contient les degrés d'appartenance de chaque objet  $x_n$  à chacune des  $K$ -classes.

GK-Moyen [GUS-92] est un autre algorithme, reconnu pour ses très bonnes performances. Cet algorithme utilise une norme adaptative de la distance, en obtenant des classes de géométrie hyper-ellipsoïdale avec des axes qui ne sont pas, nécessairement, parallèles aux axes de l'espace des données.

Ceci constitue un avantage face à l'algorithme du FKM parce que le GK-Moyen permet à chaque groupe d'adapter sa norme de distance en fonction de la structure topologique locale des données. Chaque groupe a une matrice de norme induite  $A_k$  qui permet d'obtenir la norme de distance  $D_{nk}^2$  propre à chaque classe [GUS-92].

### 2.5.4 Méthodes de prises de décision (classification)

De manière générale, on peut diviser les méthodes de classification entre méthodes avec apprentissage supervisé et méthodes avec auto-apprentissage. Les méthodes avec apprentissage supervisé ont besoin de connaître "*a priori*" les classes associées aux données d'entraînement.

Dans tous les cas, un vecteur résumant l'information (individu) qui correspond aux échantillons du système, est analysé pour trouver les caractéristiques des classes. La différence entre les deux types de méthodes est la phase d'apprentissage.

Dans le contexte des méthodes basées sur la fouille de données, les méthodes qui se situent dans le “*Machine Learning*” permettent d’obtenir des règles ou des expressions de classification plus simples, de telle sorte que les résultats obtenus soient facilement interprétables. Un des objectifs de ces méthodes est que l’intervention humaine dans la phase d’entraînement soit minimale et qu’en même temps, les classes obtenues soient facilement interprétables.

#### **2.5.4.1 Discriminant Linéaire – ACP**

Il s’agit d’un algorithme standard et qui est le plus utilisé dans différents systèmes de diagnostic industriel.

Le but principal de l’ACP est donc de trouver un ensemble de facteurs (composantes) qui ait une dimension inférieure à celle de l’ensemble original de données et qui puisse décrire correctement les tendances principales. L’ACP est une procédure qui ne prend en compte que les variables du processus. Parfois, un ensemble additionnel de données est disponible.

Le discriminant linéaire [FIL-95] suppose une distribution normale des données avec des moyennes différentes. Ce type de distribution est justifié quand il y a une grande quantité de données. L’objectif est de trouver les hyperplans qui divisent l’espace des données. En principe, un hyperplan de dimension  $d$  (avec  $d$  égal au nombre de descripteurs) est tracé de telle manière qu’il passe par le milieu de la ligne qui unit les centres de chaque classe.

L’algorithme cherche à obtenir des fonctions discriminantes paramétriques (hyperplans), à partir de la minimisation de l’erreur quadratique de classification. Par conséquent, c’est une technique qui requiert de connaître *a priori* les classes de l’ensemble des données d’entraînement. Une fois la partition de l’espace obtenue, de nouvelles données peuvent être classées.

#### **2.5.4.2 Les K plus proches Voisins (K- Nearest Neighbors)**

C’est la première méthode de classification qui ne suppose pas un type de distribution des données et c’est la première à proposer une analyse de similitude entre des données en utilisant la distance entre elles [FIX-51]. L’algorithme fait un calcul de distance entre tous les individus et chaque objet est classé dans le groupe où se trouvent ses K plus proches voisins. Les k plus proches voisins sont des individus de l’ensemble des données d’entraînement. Habituellement, la distance employée pour l’analyse est la distance euclidienne. Normalement le nombre des K voisins est un ou trois, mais cette valeur dépend de l’application [DUD-01].

## **2.6 Méthodes reposant sur une approche signal**

Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques tels que : les courants, les puissances, le couple, la vitesse, le flux, les vibrations,...etc. Dans ce que suit, on présente brièvement les transformées de Hilbert (TH), Fourier rapide (TFR), Fourier à fenêtre glissante (TFFG) et la transformée en ondelettes (TO).

### **2.6.1 Transformée de Hilbert (TH)**

C'est une technique parmi les plus connues dans le domaine du traitement de signal. Elle peut être utilisée pour analyser les signaux dans les différents secteurs techniques même en diagnostic [PEI-89]. Contrairement à la transformée de Fourier, qui transforme un signal issu du domaine temporel en un signal exprimé dans le domaine fréquentiel, la transformée de Hilbert (TH), ne change pas le domaine du signal. En effet, la transformée de Hilbert d'un signal dépendant du temps.

### **2.6.2 Transformée de Fourier Rapide (TFR)**

La transformée de Fourier rapide (TFR) est une technique largement utilisée pour la détection des défauts dans les machines asynchrones [BEN-00]. Elle donne de bons résultats pour des fonctionnements à forte puissance ou à couple constant mais des difficultés apparaissent pour les fonctionnements à couple de charge, vitesse de rotation et tensions d'alimentation variables [CUS-08]. La nécessité de trouver d'autres techniques de traitement de signal pour les signaux non stationnaires devient donc nécessaire.

### **2.6.3 Transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG)**

Pour pallier le manque d'information sur le temps dans la transformée de Fourier, la TFFG est donc introduite. Cette méthode, pouvant être adaptée aux signaux non stationnaires, est très proche de l'analyse de Fourier classique. Son principe est de définir une fenêtre qui sera utilisée comme masque sur le signal, dans laquelle on considère que le signal est localement stationnaire, puis on décale cette fenêtre le long du signal afin de l'analyser entièrement [GAB-46].

### **2.6.4 Transformée en ondelettes (TO)**

La transformée en ondelettes est un outil récent de traitement de signal [MAL-98]. Son principe repose sur la décomposition d'un signal dans une base de fonctions particulières. De ce point de vue, elle est tout à fait comparable à l'analyse de Fourier [MAL-89]. Cependant, les ondelettes sont des fonctions oscillantes au sens large, rapidement amorties, contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier. Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en temps ou en fréquence, ce qui les différencie principalement de l'analyse temps-fréquence classique [POL]. Les travaux de [ORD-08] utilisent la TO pour le diagnostic de défauts dans les machines asynchrone triphasée à cage.

## **2.7 Autres méthodes de diagnostic**

### **2.7.1 Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques**

D'après [HAN-03], le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique [CAM-86].

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B_s^2(\sigma, t)}{2\mu_0} \quad (\text{II.1})$$

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer, est le produit de la F.m.m ( $F_m$ ) et de la perméance ( $P$ ).

$$B_s = F_m \times p_m \quad (\text{II.2})$$

La force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor, en plus la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques et rotoriques, l'excentricité).

Pour la surveillance de vibrations on utilise des capteurs tels que les accéléromètres. Des balourds magnétiques, mécaniques et/ou des forces produisent des vibrations. Ces dernières sont mesurées suivant la direction radiale ou la direction axiale. Les mesures ainsi effectuées sont analysées du point de vue spectrale.

Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux enregistrés lorsque le moteur est en bon état. Ceci permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques (défauts d'enroulements statoriques, irrégularité d'entrefer et asymétrie de l'alimentation).

### **2.7.2 Diagnostic par mesure de flux magnétique**

Dans une machine idéale sans défaut, les courants et les tensions statoriques sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance à des flux de fuite axial de valeurs dépendantes du degré de sévérité du défaut. Si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. L'analyse spectrale de la tension induite dans cette bobine, peut être exploitée pour détecter les différents défauts comme la rupture de la barre rotorique [DEL-82].

### **2.7.3 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique**

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé du moteur. [JAC-95].

### **2.7.4 Diagnostic par mesure de la puissance instantanée**

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones, a fait l'objet des nombreux travaux. [MAI-92] [LEG-96]. Car la puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que

celui apportées par le courant d'une seule phase (oscillations plus importantes et plus visibles). Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres.

### 2.7.5 Diagnostic par mesure du courant statorique

Parmi tous les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants, car il est très facile d'accès et nous permet de détecter aussi bien les défauts électriques que les défauts purement mécaniques [KLI-92]. Cette technique est dénommée "Motor Current Signature Analysis" (MCSA). Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par :

- L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liée à la fréquence de rotation de la machine, aux fréquences des champs tournants et aux paramètres physiques de la machine (nombre d'encoche rotorique et nombre de paires de pôles).
- La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présentés dans le spectre du courant. La surveillance via le courant statorique nécessite une bonne connaissance des défauts et leurs signatures. Elles sont utilisées pour le moment dans le contexte de machines alimentées par le réseau et pour la recherche de fréquence caractéristique de défauts.

M. Cardoso [CAR-95] a présenté l'approche du vecteur de Park. Cette approche utilise les grandeurs biphasées  $i_{sd}$ , et  $i_{sq}$  pour l'obtention de la courbe de lissajou :  $i_{sq} = f(i_{sd})$

Sa représentation a une forme circulaire. Par conséquent toutes déformations, changement de l'épaisseur de cette courbe donne une information sur le défaut. L'Approche du Vecteur de Park Etendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park, a été proposée dans [CRU-99].

## 2.8 Choix de méthodes de surveillance pour notre application

La détection et la localisation des défaillances par estimation paramétrique, consiste à déterminer les valeurs numériques des paramètres structuraux d'un modèle de connaissance qui gouverne le comportement dynamique du système [BAC-02]. La première étape est donc, l'élaboration d'un modèle mathématique de complexité raisonnable pour caractériser la machine en fonctionnement sain et dégradé. Notre approche repose tout d'abord sur une modélisation des défauts que l'on pourra détecter. En effet, les défauts statoriques ou rotoriques doivent être discriminés au niveau des paramètres physiques estimés, pour qu'on puisse les détecter et les localiser. Le modèle de Park est souvent utilisé en diagnostic pour l'estimation paramétrique [FIL-94] [BAC-02], voici les méthodes étudiées:

**Méthodes de traitement du signal (analyse spectrale)** sont utilisées pour la surveillance de la machine asynchrone, elle consiste à analyser le spectre du courant statorique d'une seule phase (ou des trois mais de façon indépendante l'une de l'autre). Cette analyse est basée sur la comparaison du spectre du courant de phase du moteur asynchrone avec le spectre dit de référence "spectre représentant un moteur sain".

**Méthodes de redondance analytique (approche modèle)** : un modèle dynamique est utilisé en parallèle avec le système réel. En utilisant des entrées identiques et comparant les sorties du modèle aux sorties du système réel, un résidu pour la détection de défaut est généré. Alternativement, les paramètres du modèle numérique peuvent être identifiés en utilisant les entrées et les sorties du système réel. Les valeurs de ces paramètres peuvent donner des informations sur les différents défauts dans la machine.

## **2.9 Conclusion**

Ce chapitre est un prétexte à la présentation des méthodes en diagnostic, telles que les méthodes basées sur une approche système et les méthodes de traitement du signal (analyse spectrale). On a présenté aussi la transformation des mesures dans un système de diagnostic. Le choix de méthode de surveillance pour notre application termine ce chapitre. Le chapitre suivant sera consacré au développement des méthodes de diagnostic des machines asynchrones (approche signal).

**Chapitre 3**

---

**Approche signal**

---

### 3.1 Introduction

La modélisation et la simulation des machines électriques constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement sain ou défectueux et la vérification des algorithmes de détection des défauts. Elles nous permettent aussi, de construire des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Il est important donc, de synthétiser un modèle adapté au problème à traiter, décrivant le comportement de la machine d'une façon la plus fine possible. Donc la modélisation des machines électriques est une étape aussi bien pour le concepteur, elle permet l'observation et l'analyse des différentes évolutions de ces grandeurs électromagnétiques d'une part et d'autre part pour l'élaboration d'un diagnostic.

Un modèle basé sur les équations électriques et mécaniques est en général suffisant pour faire la synthèse du diagnostic. La simplicité de la formulation algébrique conduit à des temps de simulation courts. En outre, la précision de la modélisation est acceptable. Les méthodes classiques d'étude de ce type de machine utilisent des modèles simples dans le repère (d, q), négligeant un certain nombre de phénomènes. Ces modèles sont fréquemment affectés par les transformations et le changement d'axes de référence, ce qui conduit à des interprétations théoriques qui ne peuvent pas être utilisées pour analyser des effets localisés tels que les cassures des barres rotoriques de la machine en les distinguant des effets provenant d'autres incidents. D'autre part, ces modèles sont imprécis et ne décrivent qu'un fonctionnement sain de la machine [ABE-02].

Dans cette approche, le contenu spectral, l'évolution temporelle des variables mesurées sont exploitées pour détecter ces défauts. L'analyse du signal plus particulièrement est utilisée depuis de très nombreuses d'années pour détecter les défaillances dans les machines électriques. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux défauts (rupture de barres, dégradation des roulements,.....) se traduisent par l'apparition de fréquences caractéristiques directement liées à la vitesse de la machine.

Ce chapitre présente les modèles utilisés pour les simulations de la machine asynchrone, afin d'apporter la connaissance requise sur le fonctionnement du système sain et sous défaut. Nous détaillerons donc tous d'abord la machine asynchrone en mettant l'accent sur les hypothèses faites et leur validité en fonctionnement sain et défaillant. Ensuite, nous nous intéressons à la modélisation de l'onduleur. Enfin, la dernière partie traite la partie mécanique (défaut de roulement).

### 3.2 Modélisation de la machine asynchrone

L'étude du fonctionnement de la machine consiste classiquement à rechercher l'ensemble des équations reliant les variables internes aux grandeurs externes : tension aux bornes de la machine, courants consommés et couple disponible. Les différentes approches pour l'étude reposent sur la résolution des équations de l'électromagnétisme et de la mécanique. Les différences proviennent des hypothèses simplificatrices qu'il est possible de faire, en fonction du domaine de fréquence concerné et de la topologie (structure physique) du système étudié, c'est-à-dire en fonction des objectifs de la modélisation.

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction, est constituée :

- D'une armature statorique fixe comportant trois enroulements identiques à  $p$  paires de pôles et décalés d'un angle électrique de  $\frac{2\pi}{3p}$ . Ces derniers sont logés dans des encoches et reliés à la source d'alimentation. Ce dispositif crée un champ tournant de vitesse de synchronisme  $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$ .
- D'une armature rotorique mobile dont la structure peut-être constituée de trois enroulements triphasés (rotor bobiné) raccordés en étoile à trois bagues sur lesquelles frottent trois ballais fixes accessibles par la plaque à borne et mis en court-circuit pendant les régimes permanents. L'armature rotorique peut-être aussi (le plus souvent) un ensemble de conducteurs massifs intégrés aux tôles ferromagnétiques. Le rotor possède dans ce cas un certain nombre d'encoches contenant chacune une barre conductrice, en cuivre ou en aluminium. Les barres sont ensuite réunies entre elles aux deux extrémités par deux anneaux conducteurs.

### 3.2.1 Modèle triphasé

Avant d'établir le modèle de la machine asynchrone, nous rappelons brièvement les hypothèses simplificatrices, désormais classiques, retenues :

- Les circuits magnétiques sont non-saturés.
- Les pertes fer sont négligées.
- Il n'y a pas d'effet de peau.
- L'effet des encoches est négligé.
- La répartition de la force magnétomotrice est sinusoïdale.

Ce modèle permet de simuler des ensembles convertisseur-machine fonctionnant en vitesse variable. La figure III.1 présente la géométrie et la disposition des enroulements de la machine utilisée pour former les équations de la machine.

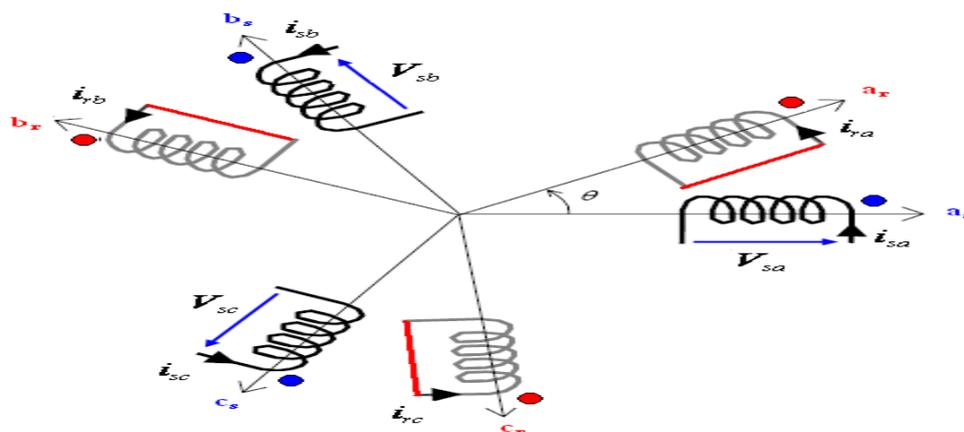


Figure III.1 Schéma de principe de la machine asynchrone

### 3.2.2 Modélisation du stator

#### 3.2.2.1 Structure du stator

Le stator de la machine étudiée est un stator triphasé de « m » encoches statoriques. Une phase statorique est composée de plusieurs bobines logées dans les encoches du stator. Ces bobines statoriques sont placées de sorte à obtenir une distribution de la force magnétomotrice la plus sinusoïdale possible le long de l'entrefer. La figure III.2 donne une représentation de la modélisation choisie pour les trois phases statoriques de la machine asynchrone. La valeur des inductances est fonction du nombre de bobines ainsi que du type de bobinage mis en place dans les encoches statoriques (concentrique, imbriqué, ...), celle des résistances dépend essentiellement de la longueur, de la section et du type de cuivre utilisé.

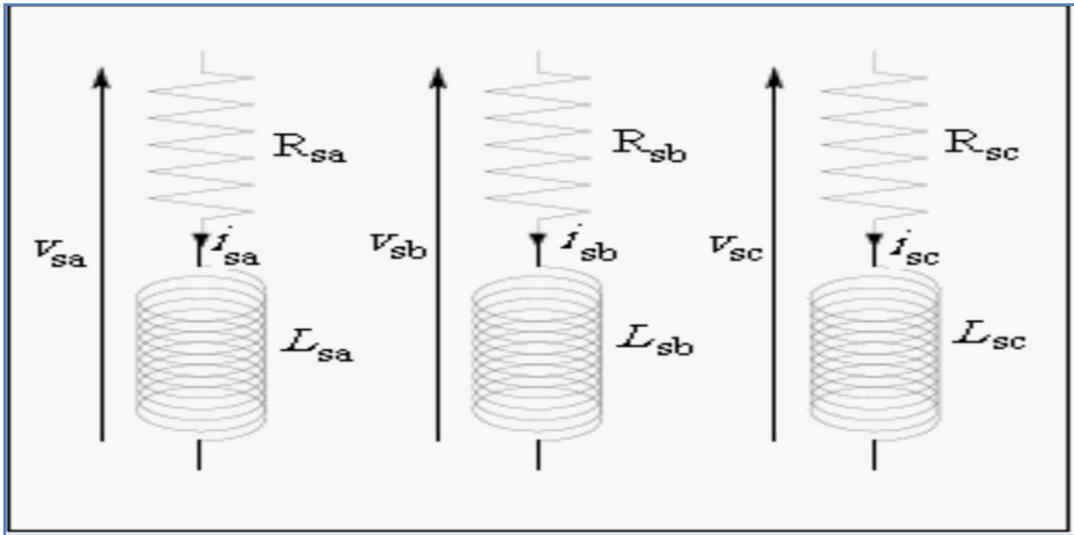


Figure III.2 Circuits électriques adoptés pour la modélisation des trois phases statoriques

#### 3.2.2.2 Les équations électriques statoriques

En utilisant les équations, on peut représenter la matrice des tensions statoriques :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \quad (\text{III.1})$$

Où la matrice des flux statoriques est donnée par :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [L_{sr}][I_r] \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$[V_s]$ : est le vecteur des tensions des phases statoriques de dimension  $m$ ,

$[I_s]$  et  $[I_r]$ : sont les vecteurs des courants des phases statoriques et rotoriques respectivement

$[R_s]$  : est la matrice diagonale des résistances des phases du stator de dimensions  $(m,m)$ .

Et :

$$[V_s] = [v_{sa} v_{sb} v_{sc}]^T \quad (\text{III.3})$$

$$[I_s] = [i_{sa} i_{sb} i_{sc}]^T \quad (\text{III.4})$$

$$[I_r] = [i_{r1} i_{r2} i_{r3} \dots i_{rnb} i_{re}]^T \quad (\text{III.5})$$

Le bobinage statorique ayant  $m$  phases, les vecteurs  $[V_s]$ ,  $[I_s]$  et  $[\Phi_s]$  et la matrice des résistances  $[R_s]$  s'écrivent de la façon suivante :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ \dots \\ \dots \\ V_{Sm} \end{bmatrix}; [I_s] = \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ \dots \\ \dots \\ i_{sm} \end{bmatrix}; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{S1} \\ \Phi_{S2} \\ \dots \\ \dots \\ \Phi_{Sm} \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_{S1} & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & R_{S2} & 0 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & R_{Sm} \end{bmatrix}$$

Le vecteur flux statorique  $[\Phi_s]$  s'exprime en fonction des vecteurs courants statoriques et courants rotoriques de la manière suivante :

$$[\Phi_s] = [L_{SS}][I_s] + [L_{SR}][I_r] \quad (\text{III.6})$$

Où les matrices  $[L_{SS}]$  et  $[L_{SR}]$  sont respectivement la matrice des inductances propres et mutuelles des enroulements statoriques et celle des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et ceux rotoriques. Ces deux matrices s'écrivent :

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} L_{SS11} + L_{S1} & L_{SS12} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{SS1m} \\ L_{SS21} & L_{SS22} + L_{S2} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{SS2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ L_{SSm1} & L_{SSm2} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{SSmm} + L_{\sigma Sm} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

$$[L_{SR}] = \begin{bmatrix} L_{SR11} & L_{SR12} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{SR1q} & L_{SR1q+1} \\ L_{SR21} & L_{SR22} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{SR2q} & L_{SR2q+1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ L_{SRm1} & L_{SRm2} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{SRmq} & L_{SRmq+1} \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

On peut remarquer, à ce stade, que la matrice  $[L_{SS}]$  est de dimensions  $(m, m)$  compte tenu du nombre de phases statoriques alors que la matrice  $[L_{SR}]$  est de dimensions  $(m, q+1)$  ce qui implique que le vecteur des courants rotoriques comportera  $q+1$  éléments correspondants aux  $q$  mailles ( $q$  barres) de la cage plus la maille de l'anneau de court-circuit.

En remplaçant l'équation (III.2) dans (III.1), on obtient :

$$[V_r] = [R_s][I_s] + [L_{SS}] \frac{d[I_s]}{dt} + [L_{SR}] \frac{d[I_r]}{dt} + \frac{d[L_{SR}]}{dt} [I_r] \quad (\text{III.9})$$

Le dernier terme de l'équation (III.9) peut être écrit comme suit :

$$\frac{d[L_{SR}]}{dt} [I_r] = \frac{d[L_{SR}]}{d\theta_r} \frac{d[\theta_r]}{dt} [I_r] \quad (\text{III.10})$$

Où  $\theta_r$  est l'angle qui définit la position du rotor par rapport au stator.

Avec :

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{III.11})$$

Où  $\omega_r$  :est la vitesse mécanique du rotor.

Par substitution (III.10) et (III.11) dans (III.9), on obtient :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + [L_{SS}] \frac{d[I_s]}{dt} + [L_{SR}] \frac{d[I_s]}{dt} + \omega_r \frac{d[L_{SR}]}{d\theta_r} [I_r] \quad (\text{III.12})$$

### 3.2.3 Modélisation du rotor

#### 3.2.3.1 Structure du rotor

Considérons une cage d'écurie qui contient  $n_b$  barres et  $2n_b$  sections d'anneau (figure III.3). Les courants  $I_{r1} \dots I_{rn_b}$  et  $I_e$  de  $n_b + 1$  mailles du rotor sont considérés comme des inconnus, illustrés par la figure suivante :

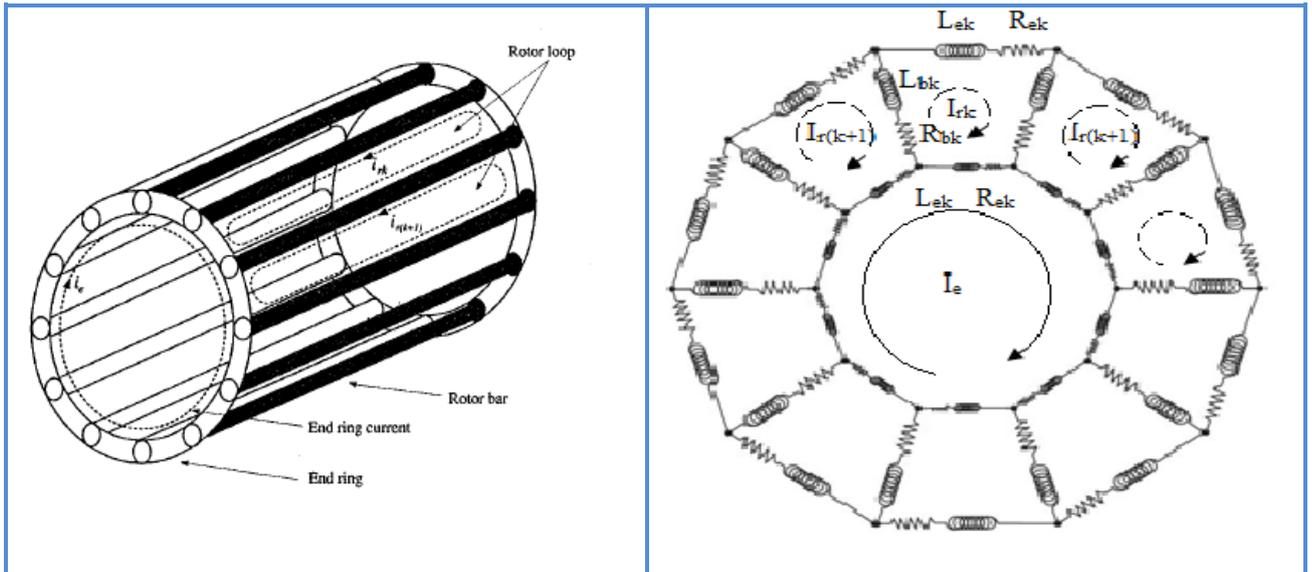


Figure III.3 Circuit équivalent d'un rotor à cage sain

### 3.2.3.2 Equations des tensions rotoriques

La modélisation de la cage rotorique repose sur le schéma équivalent de la figure III.3 où elle a été développée en forme circulaire. Chaque barre de la cage est représentée par une résistance de barre  $R_b$  en série avec une inductance de fuite de barre  $L_{ob}$ . Les portions d'anneau de court-circuit entre deux barres consécutives sont elles aussi représentées par une résistance de portion d'anneau  $R_e$  en série avec une inductance de fuite de portion d'anneau  $L_{oe}$ . Une maille de la cage est constituée par deux barres consécutives court-circuitées par deux portions d'anneau d'un côté et de l'autre de la machine.

Par conséquent, la cage sera donc modélisée par  $q$  mailles situées à la périphérie du rotor plus une maille représentant l'un des deux anneaux de court-circuit. En effet, ayant  $q$  barres, la cage comporte donc  $2q$  nœuds et  $3q$  branches au sens de la théorie des circuits. Par conséquent, les courants indépendants dans la cage sont au nombre de :  $3q - (2q - 1) = q + 1$ .

La mise en équation de la maille rotorique  $k$  de la cage donne lieu à l'expression suivante :

$$-R_b i_{rk-1} + 2(R_b + R_e) \cdot i_{rk} - R_b i_{rk+1} - R_e i_e + \frac{d}{dt} \Phi_{Rk} + \frac{d}{dt} \Phi_{Sk} = 0 \quad (\text{III.13})$$

Où  $\Phi_{Rk}$  et  $\Phi_{Sk}$  sont respectivement le flux de la cage envoyé à travers la maille  $k$ , y compris le flux propre de la maille  $k$ , et le flux envoyé par les bobinages statoriques à travers la maille  $k$ . De la même façon pour le stator et en désignant par  $L_{RRkn}$  l'inductance mutuelle entre la maille  $k$  et la maille  $n$  d'un côté, et par  $L_{RSkn}$  l'inductance mutuelle entre la maille  $k$  et la phase statorique  $n$  de l'autre, les flux  $\Phi_{Rk}$  et  $\Phi_{Sk}$  s'écrivent en fonction des courants de mailles et de phases de la façon suivante :

$$\begin{aligned}\Phi_{Rk} &= (L_{RRkk-1} - L_{\sigma b}) \cdot i_{Rk-1} + (L_{RRkk} + 2(L_{\sigma b} + L_{\sigma e})) \cdot i_{Rk} + (L_{RRkk+1} - L_{\sigma b}) \cdot i_{Rk+1} \\ &\quad + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k-1 \\ n \neq k \\ n \neq k+1}}^q L_{RRkn} i_{Rn} - L_{\sigma e} i_e \\ \Phi_{Sk} &= \sum_{n=1}^m L_{RSkn} i_{Sn}\end{aligned}\tag{III.14}$$

Les équations précédentes peuvent être généralisées à toutes les mailles de la cage. A cela, il faut ajouter l'équation d'un anneau de court-circuit en considérant qu'il n'y a pas de flux axial dans la machine :

$$qR_e i_e - \sum_{n=1}^m R_e i_{Rn} + \frac{d}{dt} (qL_e i_e - \sum_{n=1}^q L_e i_{Rn}) = 0\tag{III.15}$$

En regroupant les équations précédentes (III-14) (III-2) sous forme matricielle, on aboutit à l'équation du rotor :

$$[0] = [R_R][I_R] + \frac{d}{dt} [\Phi_R]\tag{III.16}$$

Où :

$[I_R]$  est le vecteur des courants de mailles rotoriques, de dimension  $q+1$ ,

$[\Phi_R]$  est le vecteur des flux traversant les mailles rotoriques, de dimension  $q+1$ ,

$[R_R]$  est la matrice des résistances de la cage, de dimensions  $(q+1, q+1)$ .

Les formes des vecteurs  $[I_R]$  et  $[\Phi_R]$  sont les suivantes :

$$[I_R]^t = [i_{R1} \ i_{R2} \ \dots \ i_{Rq+1}]^t \quad \text{et} \quad [\Phi_R]^t = [\Phi_{R1} \ \Phi_{R2} \ \dots \ \Phi_{Rq+1}]^t$$

Et la matrice des résistances :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & \dots & 0 & -R_b & -R_e \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & \dots & 0 & 0 & -R_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 2(R_b + R_e) & -R_b & -R_e \\ -R_b & 0 & 0 & \dots & -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_e \\ -R_e & -R_e & -R_e & \dots & -R_e & -R_e & qR_e \end{bmatrix}\tag{III.17}$$

Où  $R_b$  et  $R_e$  sont respectivement la résistance d'une barre rotorique et celle d'un segment de l'anneau de court-circuit.

Le vecteur flux rotorique  $[\Phi_R]$  s'exprime en fonction des vecteurs courants rotoriques et statoriques de la manière suivante :

$$[\Phi_R] = [L_{RR}][I_R] + [L_{RS}][I_S] \quad (\text{III.18})$$

Où les matrices  $[L_{RR}]$  et  $[L_{RS}]$  sont respectivement la matrice des inductances propres et mutuelles des enroulements rotoriques et celle des inductances mutuelles entre les enroulements rotoriques et statoriques.  $[L_{RR}]$  est de dimensions  $(q+1, q+1)$  et  $[L_{RS}]$  est de dimensions  $(q+1, m)$ . Ces deux matrices s'écrivent de la façon suivante :

$$[L_{RS}] = \begin{bmatrix} L_{RS11} & L_{RS12} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{RS1m-1} & L_{RS1m} \\ L_{RS21} & L_{RS22} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{RS2m-1} & L_{RS2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ L_{RSq1} & L_{RSq2} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{RSqm-1} & L_{RSqm} \\ L_{RSq+11} & L_{RSq+12} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{RSq+1m-1} & L_{RSq+1m} \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

$$[L_{RR}] = \begin{bmatrix} L_{RR11} + 2(L_{\sigma b} + L_{\sigma e}) & L_{RR12} - L_{\sigma b} & L_{RR13} & \dots & L_{RR1q} - L_{\sigma b} & -L_{\sigma e} \\ L_{RR21} - L_{\sigma b} & L_{RR22} + 2(L_{\sigma b} + L_{\sigma e}) & L_{RR23} - L_{\sigma b} & \dots & L_{RR2q} & -L_{\sigma e} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & -L_{\sigma e} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ L_{RRq1} - L_{\sigma b} & \cdot & \cdot & \dots & L_{RRqq} + 2(L_{\sigma b} + L_{\sigma e}) & -L_{\sigma e} \\ -L_{\sigma e} & -L_{\sigma e} & \cdot & \dots & -L_{\sigma e} & qL_{\sigma e} \end{bmatrix}$$

$L_{RRij}$ : Inductance de magnétisation d'une maille rotorique

$L_{\sigma b}$ : Inductance de fuite d'une barre rotorique

$L_{\sigma e}$ : Inductance de fuite d'un segment d'anneau de court-circuit

$L_{rij}$ : Inductance mutuelle entre l' $i^{\text{ème}}$  et la  $j^{\text{ème}}$  maille rotorique

La matrice des inductances mutuelles entre les mailles rotoriques et les phases statoriques  $[L_{RS}]$  est égale à la transposée de la matrice  $[L_{SR}]$  dans le cas d'un moteur avec entrefer uniforme.

$$[L_{RS}] = [L_{SR}]^T$$

### 3.2.4 Système d'équations global de la machine

Les deux équations matricielles (III-1) et (III-16) du stator et du rotor peuvent être regroupées dans une seule équation donnant lieu au système complet d'équations régissant le fonctionnement de la machine asynchrone à cage dans l'espace de phases :

$$[V] = [R][I] + \frac{d}{dt} \{ [L] \cdot [I] \} \quad (\text{III.21})$$

Ce qui peut se mettre encore sous la forme:

$$[V] = [R][I] + \Omega \cdot \left\{ \frac{d}{d\theta_m} [L] \right\} \cdot [I] + [L] \left\{ \frac{d}{dt} [I] \right\} \quad (\text{III.22})$$

Où :  $[V] = \begin{bmatrix} [V_S] \\ [0] \end{bmatrix}$  et  $[I] = \begin{bmatrix} [I_S] \\ [I_R] \end{bmatrix}$  de dimension  $m+q+1$ ,

ainsi que  $[R] = \begin{bmatrix} [R_S] & [0] \\ [0] & [R_R] \end{bmatrix}$  et  $[L] = \begin{bmatrix} [L_{SS}] & [L_{SR}] \\ [L_{RS}] & [L_{RR}] \end{bmatrix}$  de dimension  $(m+q+1, m+q+1)$

et  $\Omega = \frac{d\theta_m}{dt}$  est la vitesse mécanique de rotation du rotor.

### 3.2.5 Présentation de l'onduleur

Pour l'entraînement électrique asynchrone, le convertisseur continu-alternatif est un onduleur de tension. Il est constitué de trois bras (A, B, C) composés chacun de deux transistors IGBT et de deux diodes en antiparallèle.

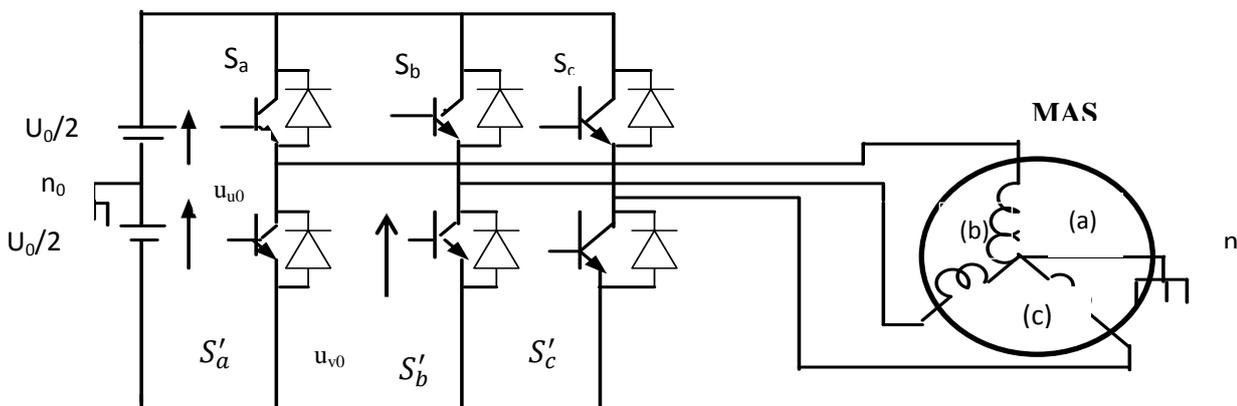


Figure III.4 Schéma électrique de l'association onduleur / machine asynchrone

Les tensions fournies par chaque demi pont ( $S_a-S_a'$ ,  $S_b-S_b'$  et  $S_c-S_c'$ ) (Fig.III.4) sont les suivantes :

$u_{u0} = +E$ , quand  $S_a$  est fermé.

$u_{u0} = -E$ , quand  $S_a'$  est fermé.

$u_{v0} = +E$ , quand  $S_b$  est fermé.

Les tensions notées  $u_{un}, u_{vn}, u_{wn}$ , sont données par les relations suivantes:

$$u_{un} = \frac{2}{3} \cdot u_{u0} - \frac{1}{3} \cdot u_{v0} - \frac{1}{3} \cdot u_{w0} \quad (\text{III.23})$$

$$u_{vn} = -\frac{1}{3} \cdot u_{u0} + \frac{2}{3} \cdot u_{v0} - \frac{1}{3} \cdot u_{w0} \quad (\text{III.24})$$

$$u_{wn} = -\frac{1}{3} \cdot u_{u0} - \frac{1}{3} \cdot u_{v0} + \frac{2}{3} \cdot u_{w0} \quad (\text{III.25})$$

$$u_n = \frac{1}{3} (u_{u0} + u_{v0} + u_{w0}) \quad (\text{III.26})$$

### 3.3 Description de l'entraînement

L'entraînement est composé d'une machine à induction, onduleur de largeur d'impulsion, commande de flux rotorique -orienté, une boucle de mesure du courant et une boucle de contrôle de vitesse. La figure III.5 présente le schéma global de l'ensemble.

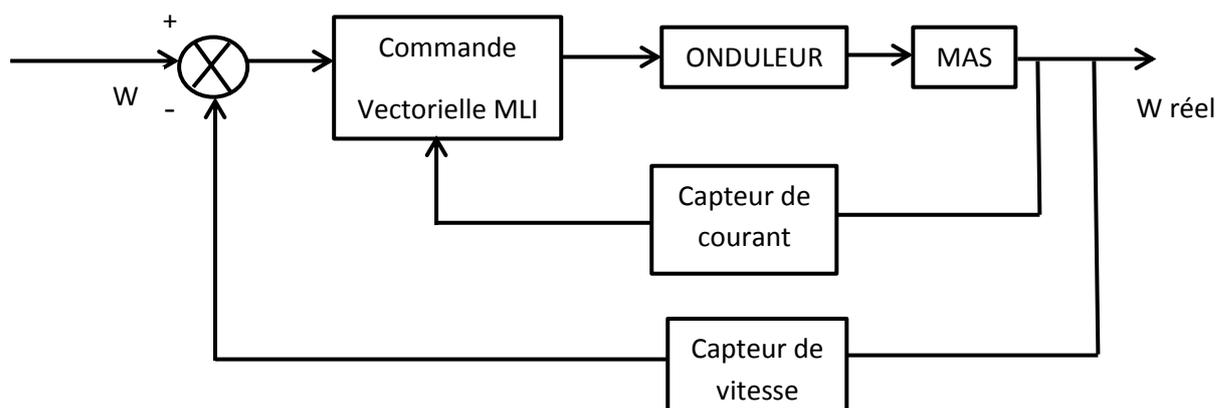


Figure III.5 Schéma bloc du système simplifié

Pour l'implémentation du modèle en simulation, nous avons inversé les systèmes équations électriques par Matlab. On obtient donc les équations du courant en fonction des flux et les équations des dérivés des flux en fonction des tensions et des courants. Ce problème est dû à la prise en compte de la variation des inductances.

### 3.4 Résultats de simulation

#### 3.4.1 Machine saine

Le moteur a été démarré en se basant sur la commande en vitesse et en flux et par la tension statorique, qui sont engendrées par le convertisseur coté machine, et cela à partir des états électriques et mécaniques initialement nulle (machine à l'arrêt). Aucune procédure de démarrage traditionnel n'a été utilisée.

Notre démarche dans cette partie de simulation est de voir le comportement de la machine asynchrone en mode sain et avec défaut électrique (stator, rotor, onduleur) dans le régime transitoire et permanent. La figure III.6 illustre les courants statoriques des phases (a,b,c) la vitesse et le couple électromagnétique.

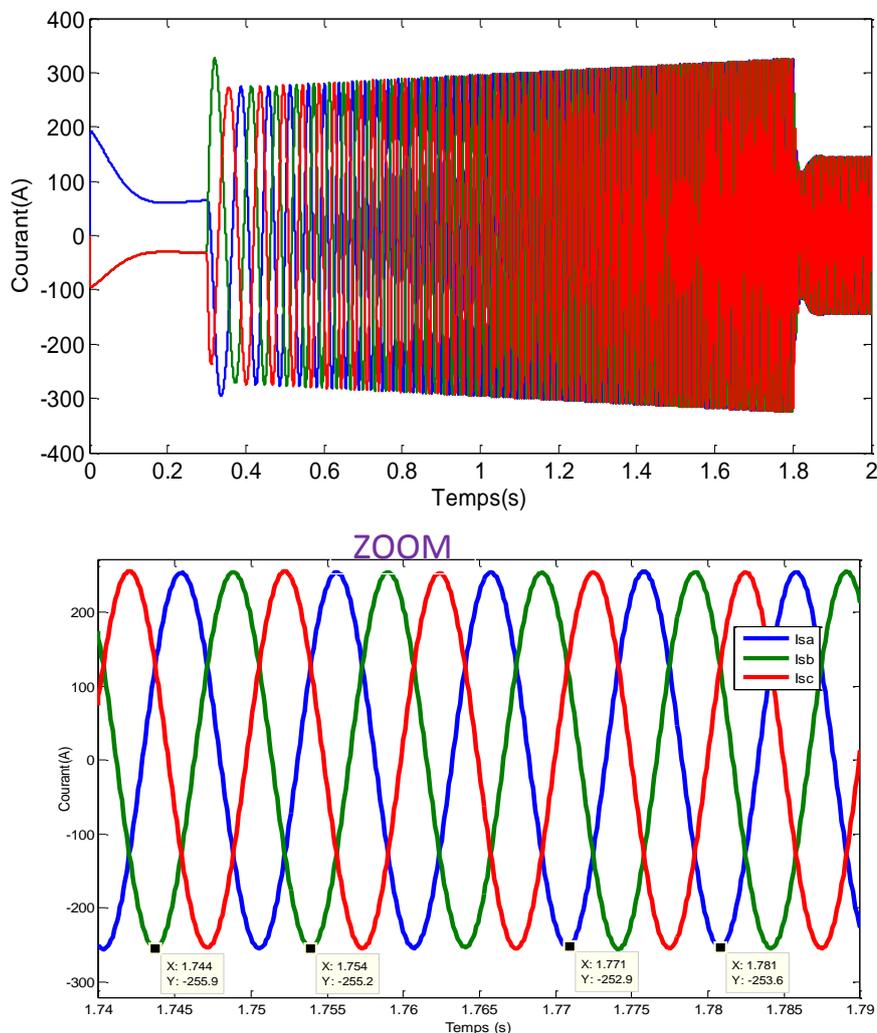


Figure III.6 Les courants statoriques des phases

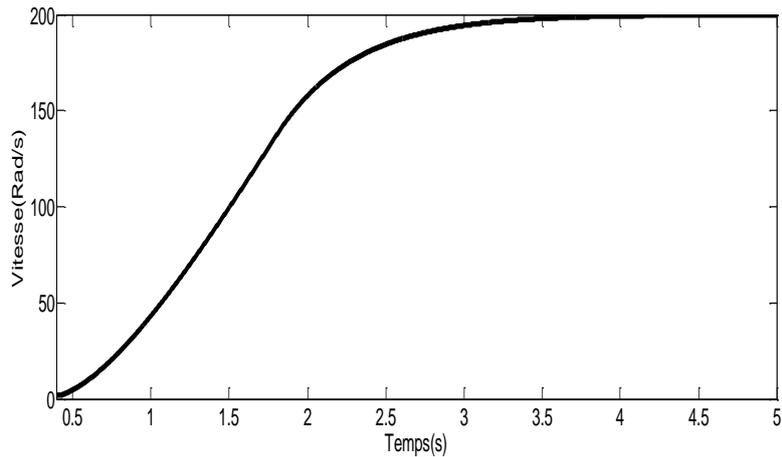


Figure III.7 La vitesse de la machine sain

La figure suivante présente l'évolution du couple produit par la machine asynchrone. On trouve la phase d'accélération (avec un dépassement lié à la commande en vitesse) et la phase de stabilisation de la vitesse et donc du couple.

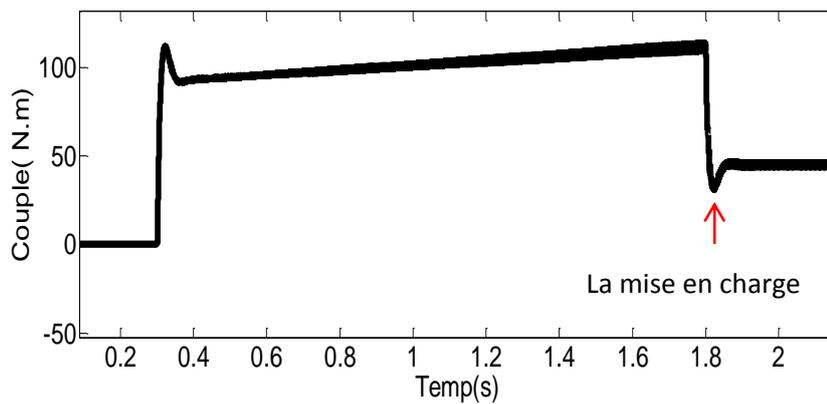


Figure III.8 Le couple électromagnétique (machine sain)

### 3.4.2 La signature spectrale du courant statorique de la machine saine

Le but de la caractérisation fréquentielle des défauts consiste, en fonction du défaut considéré, à déterminer la (ou les) fréquence (s) liée (s) au défaut et à discriminer la variable (mesurée ou calculée) la plus pertinente dans laquelle cette fréquence peut être isolée. La figure III.9 montre la fréquence électrique  $f_e=100\text{Hz}$  du spectre du courant statorique ( $I_{sa}$ ) de la phase a de la machine asynchrone sans court-circuit.

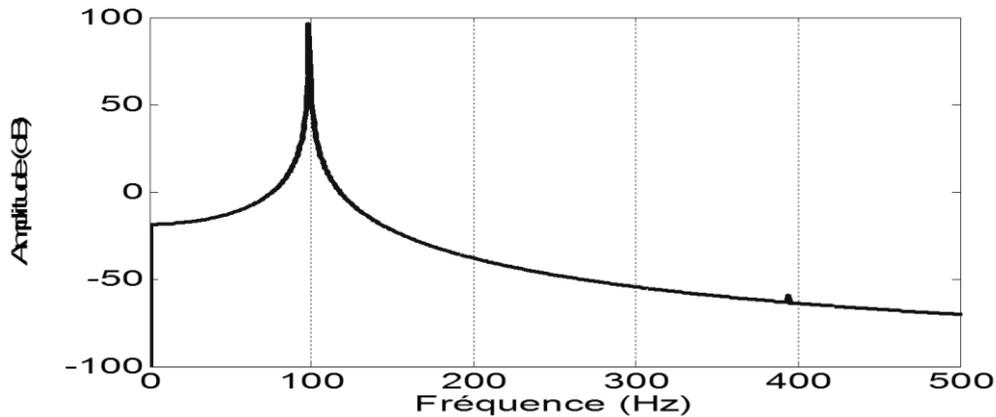
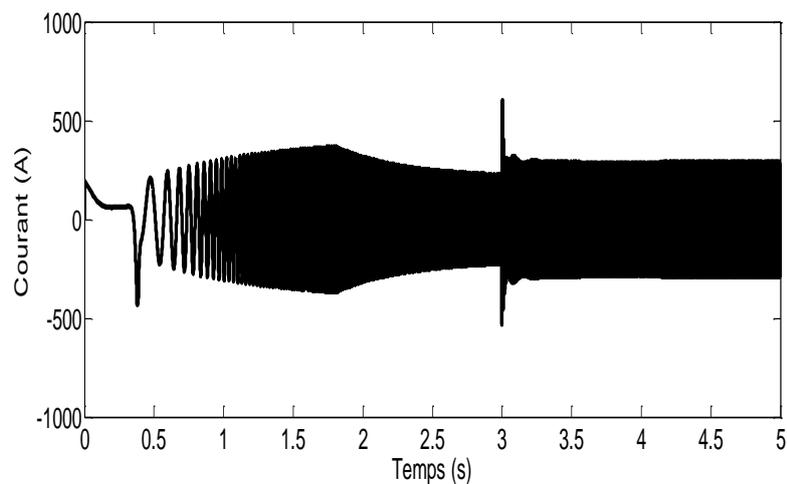


Figure III.9 Spectre du courant statorique de la phase a

### 3.4.3 Défaut au stator de la machine

Le défaut considéré consiste en une suppression des bobinages d'une phase du stator. Ce défaut se caractérise par l'apparition d'une raie au triple de la fréquence électrique [FRA-91, SCH-94] dans le spectre du courant de la machine quelle que soit la phase considérée comme indiqué sur la figure III.10. Nous n'avons présenté que le spectre du courant car les évolutions de l'allure du courant ne sont pas significatives. Par ailleurs, dans le cas du système bouclé, la commande va corriger l'éventuelle baisse d'amplitude. On retrouvera alors cette information caractéristique du défaut dans les sorties de la commande vectorielle mais au double de la fréquence électrique (pour la grandeur exprimée dans le référentiel de Park), le rapport entre l'amplitude de la raie associée au défaut et celle du fondamental où la grandeur continue dépend de la variable choisie (courant ou grandeur de commande) et des fréquences de fonctionnement. La figure III.10 montre la fréquence électrique  $f_e=100\text{Hz}$  du spectre du courant statorique ( $I_{sa}$ ) de la phase a de la machine asynchrone sans court-circuit. Le défaut au stator de la machine est engendré par court-circuit au niveau des bobinages statorique. Il est simulé en agissant sur le modèle du stator que nous avons donné dans 3.2.2.2.



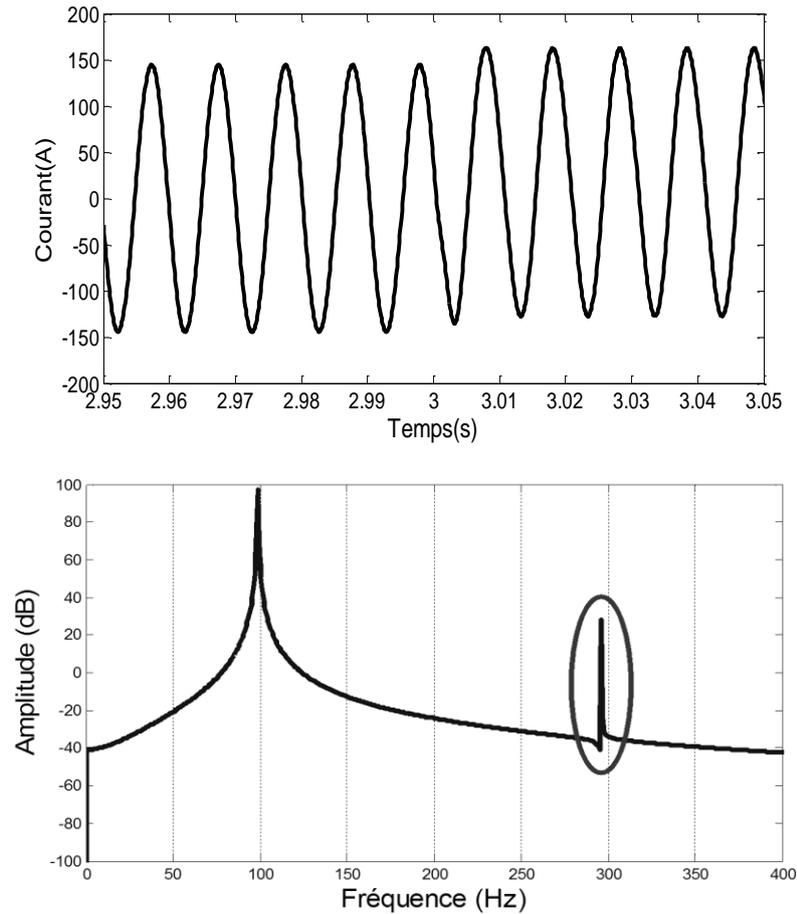
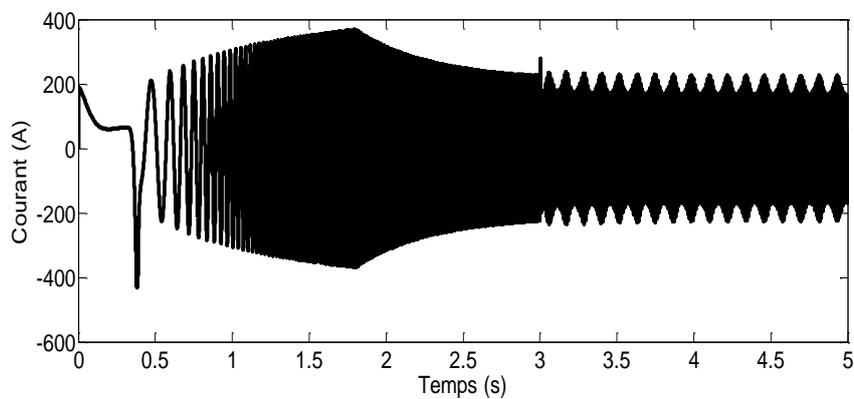


Figure III.10 L'allure du courant et le spectre du courant statorique avec défaut sur une phase au stator

### 3.4.4 Défaut rotor

Pour un défaut au rotor, il apparaît aussi de nouvelles fréquences dans le spectre du courant stator comme le montre la figure III.11. Dans les simulations on fait agir sur le modèle que l'on avait présenté précédemment pour simuler le court-circuit rotorique sont engendrés bien par les facteurs environnementaux (chaleur, vibration, vieillissement machine).



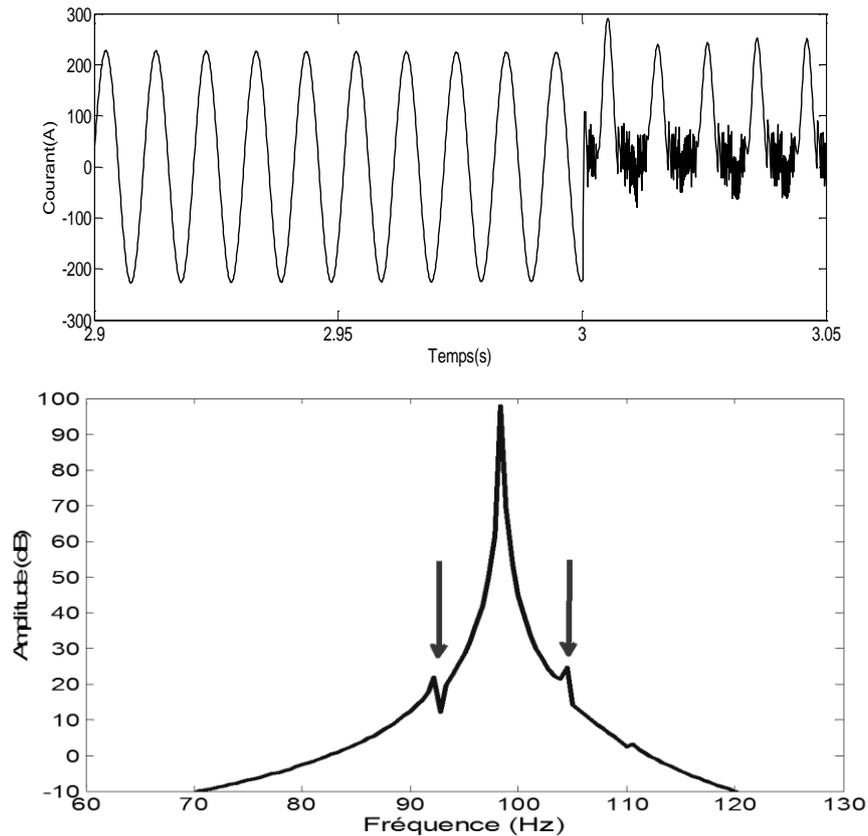
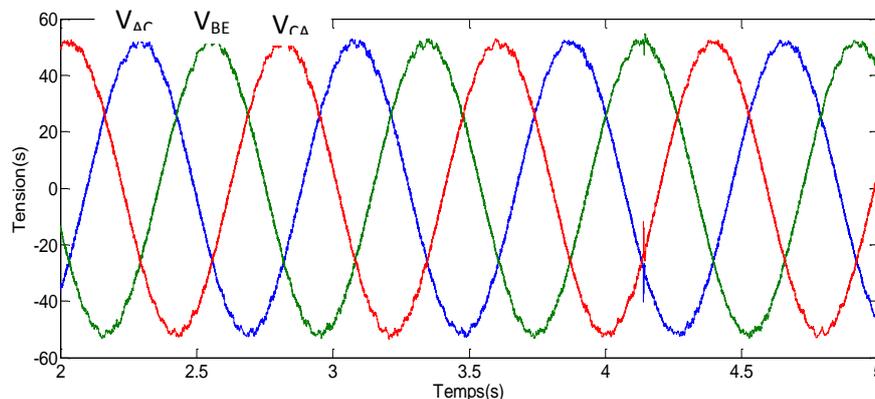


Figure III.11 L'allure du courant et le spectre du courant statorique avec défaut sur une phase au rotor

La figure III.11 présente les fréquences qui caractérisent le défaut par l'apparition de deux fréquences au tour de la fréquence électrique ( $1 \pm 2g$ ) où  $g$  représente le glissement. Remarquons que ce défaut sera très difficile à détecter dans le spectre du courant car l'amplitude de la raie à la fréquence fondamentale est très importante par rapport à celle de la raie recherchée.

### 3.4.5 Comportement défaillant de l'onduleur

D'après les statistiques rappelées au chapitre I, nous avons choisi de prendre compte des effets d'un composant ouvert. Pour cela, nous avons inclus un bloc permettant de bloquer les ordres de commande arrivant à l'interrupteur considéré comme défaillant.



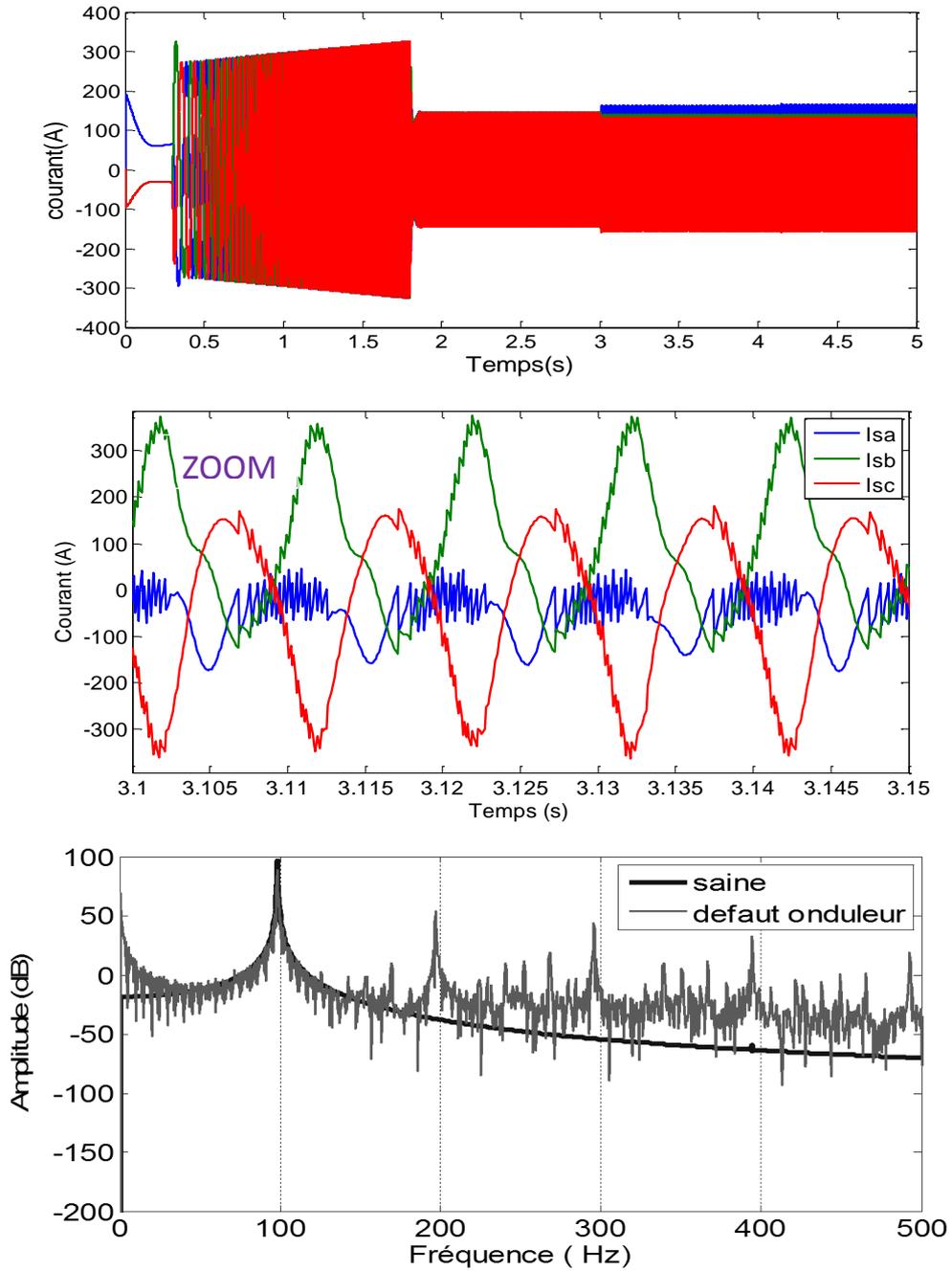


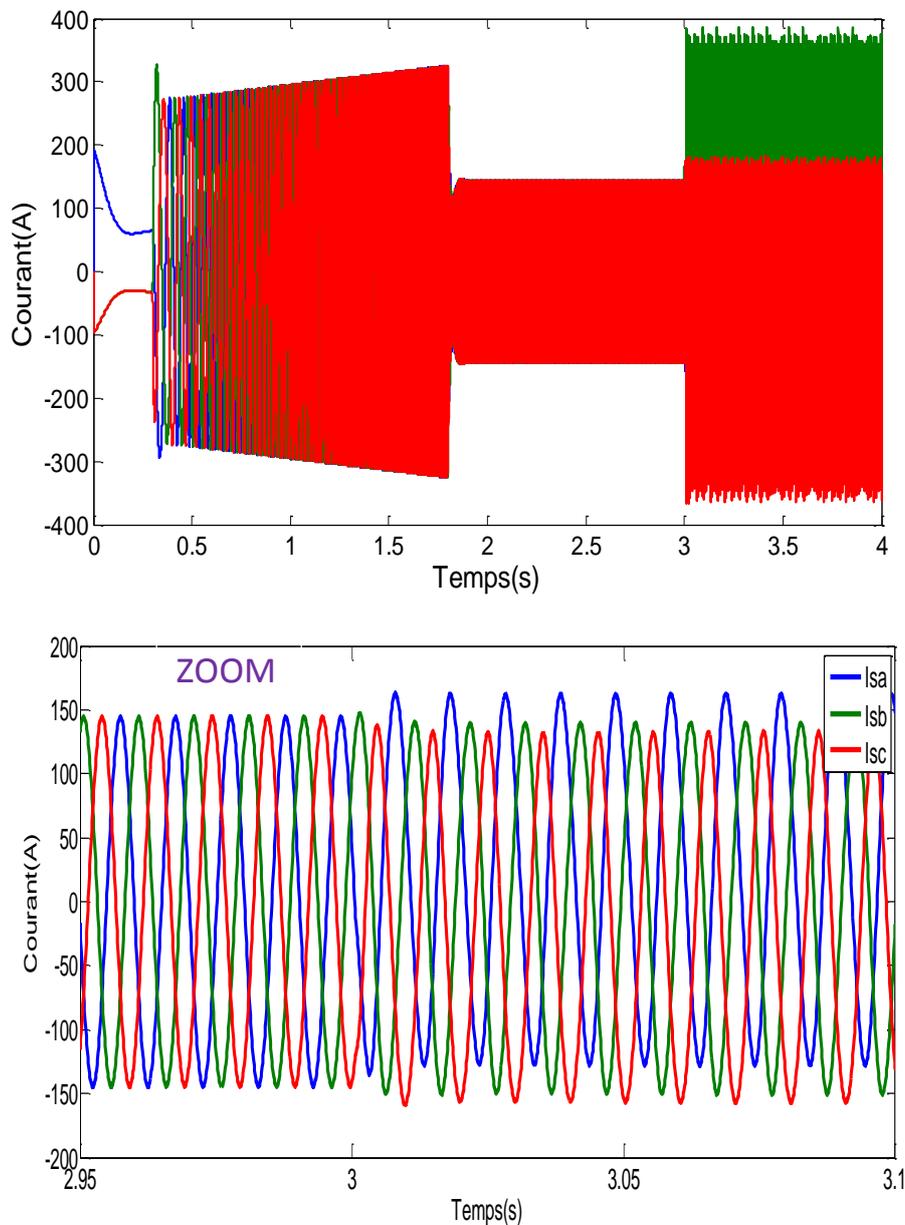
Figure III.12 L'allure des courants statoriques et le spectre de la machine saine avec défaut onduleur

Des raies aux fréquences felectrique (fréquence électrique) et 2felectrique (double de la fréquence électrique) apparaissent dans le spectre du courant. L'apparition des raies autour de la fréquence électrique  $kf_e$  avec  $k=1, 2, 3, \dots$ .

### 3.4.6 Caractérisation du défaut capteur de courant

Pour ce défaut (un offset de mesure sur la phase a), l'analyse du contenu spectral du courant peut s'avérer efficace. En effet, le contrôle vectoriel va imposer que les courants mesurés suivent la référence. Il apparaîtra alors, par composition des signaux, des fréquences multiples de la fréquence fondamentale, en particulier la fréquence double. La figure III.11 présente de spectre du courant mesuré lorsque le capteur est défaillant.

Notant que cette raie peut aussi être détectée dans les grandeurs de commande (tensions de référence dans le référentiel de Park,...). Ces données étant continues, la raie sera alors à la fréquence fondamentale des courants.



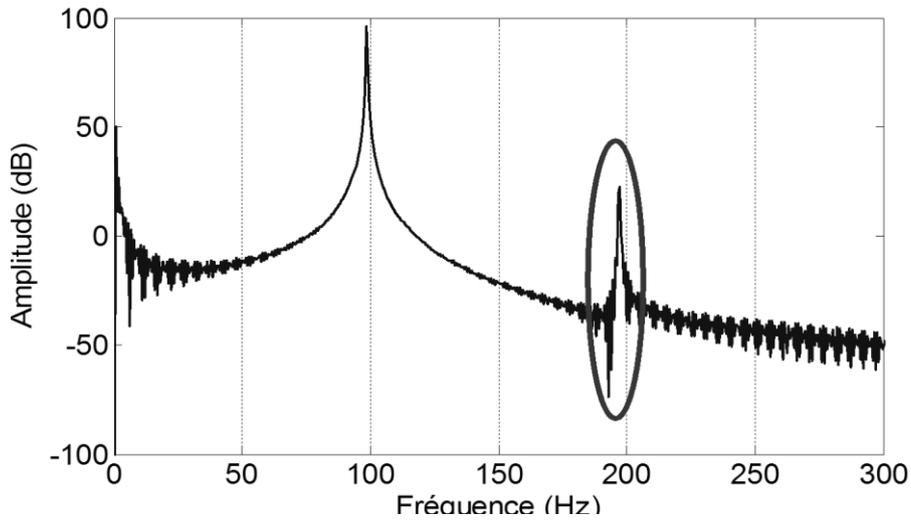


Figure III.13 L'allure du courant et le spectre du courant de la phase a de la machine avec défaut

Notant qu'il existe aussi une fréquence caractéristique du défaut en haute fréquence : ce défaut générant une machine asymétrique, il existera aussi une composante à la fréquence de MLI.

### 3.4.7 Effet d'un défaut sur le capteur de vitesse

Nous présentons ce type de défaut pour insister sur l'importance de le détecter mais comme les variables concernées sont continues, il n'existe pas, à notre connaissance, de fréquence caractéristique pour ce défaut. Comme dans le cas précédent, la vitesse mesurée suit la référence imposée. Il faut donc étudier l'évolution d'une autre grandeur ou reconstruire la vitesse pour le comparer avec la vitesse mesurée. La figure III.14 présente les différentes variables à prendre en compte.

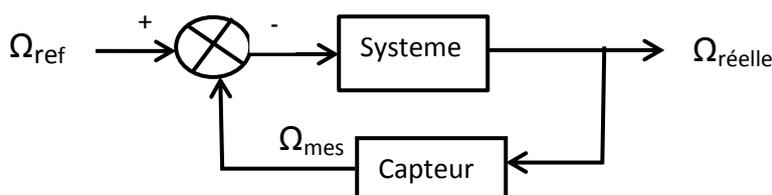


Figure III.14 Représentation schématique du système à surveiller

Nous proposons tout d'abord de suivre l'évolution de la pulsation statorique imposée par la commande vectorielle. En effet, cette grandeur est une image (au glissement près) de la vitesse réelle de la machine. S'il apparaît un écart important entre la pulsation stator et la vitesse électrique ( $p\Omega$ ), cela pourra résulter d'une erreur sur la vitesse mesurée.

En effet lors de l'application du défaut (le défaut de type offset), le contrôle de vitesse va réagir en faisant évoluer la référence de couple. Par le biais des équations de la commande vectorielle, ceci signifie que la pulsation statorique imposée par la commande va évoluer.

La figure III.15 présente l'allure de la vitesse mesurée pour une erreur de capteur de 5 Rad/s (soit 2.5% de la valeur de référence). On remarque que le contrôle de la vitesse réagit de manière à compenser l'offset qui apparaît sur la vitesse mesurée.

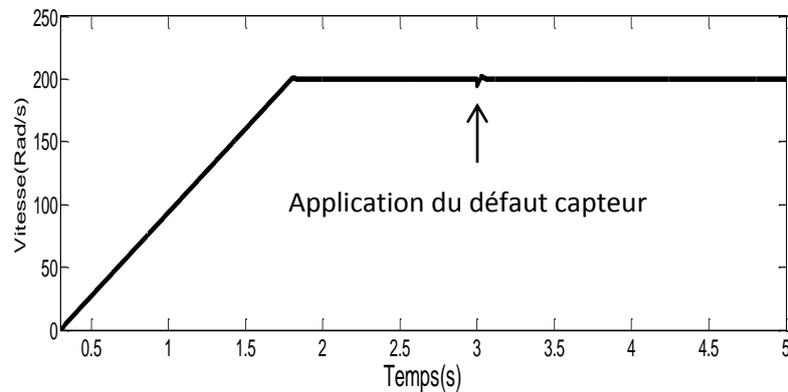


Figure III.15 Vitesse mesurée lors d'un défaut capteur de vitesse

Cette compensation de la vitesse produit donc une augmentation de la pulsation stator comme le montre la figure III.16.

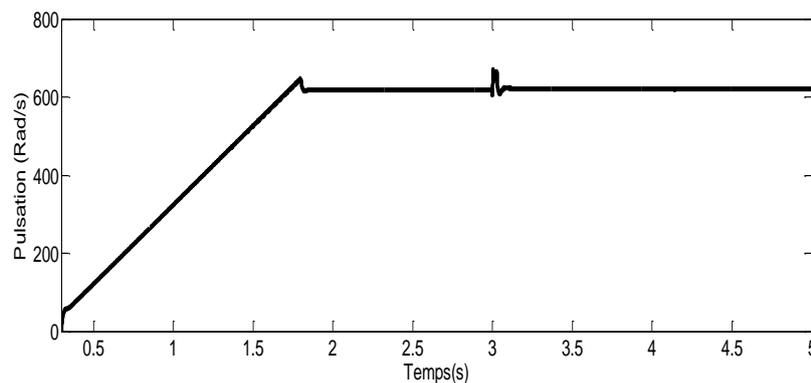


Figure III.16 La pulsation stator lors d'un défaut capteur de vitesse

Il faut cependant remarquer que les informations position et vitesse mesurées sont fournies à la commande afin de placer le repère tournant. Cependant l'orientation des grandeurs magnétiques dans la machine diffère de celles de la commande, il y a risque de décrochage de la machine si l'erreur est trop forte entre les deux repères.

### 3.5 La partie mécanique

#### 3.5.1 Modèles utilisés

Afin de bien représenter la partie mécanique de l'entraînement électrique, nous avons schématisé la transmission par un arbre flexible avec réducteur. Elle contient des roulements qui assurent le parfait alignement des axes des pièces tournantes. Nous avons considéré qu'ils n'intervenaient pas dans les équations mécaniques du système lorsqu'ils sont sains.

En revanche, lorsqu'un défaut se produit sur ces éléments, nous les prenons en compte par la génération d'un couple de perturbation.

- **Modèle de la transmission**

Le couple moteur transmis à la roue par le biais d'un réducteur à double train épicycloïdal. Nous avons présenté un modèle permettant de représenter les deux phénomènes les plus importants: la transmission et l'irrégularité du couple transmis due aux dents de l'engrènement et l'élasticité comme le montre la figure III.17.

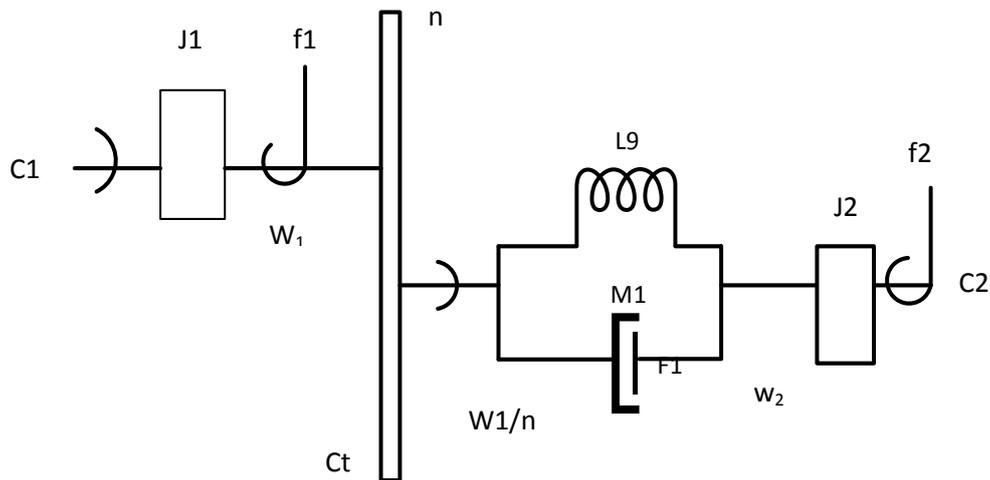


Figure III.17 Modèle d'une transmission flexible [MAR-93]

Les équations de cette transmission sont les suivantes :

$$\begin{aligned}
 C_1 &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + f_1 \omega_1 + \frac{C_t}{n} \\
 C_t &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt} + f_2 \omega_2 + C_2 \\
 C_t &= k \left( \frac{\theta_1}{n} - \theta_2 \right) + d \left( \frac{\omega_1}{n} - \omega_2 \right)
 \end{aligned}
 \tag{III.23}$$

### 3.5.2 Les roulements

La défaillance d'un roulement se manifeste par des ondulations de surface des billes, par des fissures dans les deux bagues « interne et externe » ou par la détérioration de la cage. La détection de ces défauts a été largement étudiée à l'aide de la technique vibratoire [REZ-06]. Malheureusement, la fiabilité des résultats est fortement liée à la position des accéléromètres sur les paliers. En revanche, l'analyse des courants statoriques s'est avérée être très intéressante, car elle permet de diagnostiquer aussi bien les défauts électriques que mécaniques [BOU-07]. De plus, la mesure du courant peut être prise à n'importe quelle position entre le moteur et le poste d'alimentation. Par ailleurs, Schoen et ses coauteurs [BOU-07], ont démontré qu'une défaillance des roulements se manifeste dans le spectre du courant statorique sous la forme d'harmoniques définis par l'expression suivante:

$$f_{roul}(HZ) = |f_a \pm k f_{bague.ext}| \quad (III.24)$$

Où  $f_a$  est la fréquence d'alimentation,  $k = 1, 2, 3, \dots$  et  $f_{bague.ext}$  est la fréquence caractéristique des vibrations induites par le défaut de la bague externe. Plusieurs études [TOL-12] ont démontré que cette fréquence caractéristique du défaut de la bague externe est définie comme suite:

$$f_{bague,ext} = \frac{N_b}{2} f_r \left( 1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right) \quad (III.25)$$

Où  $f_r$  est la fréquence de rotation du moteur et d'après la figure III.18 qui représente la géométrie du roulement,  $N_b$  est le nombre de billes,  $D_b$  et  $D_c$  sont respectivement le diamètre de la bille et de la cage,  $\beta$  étant l'angle de contact (Fig. III.18).

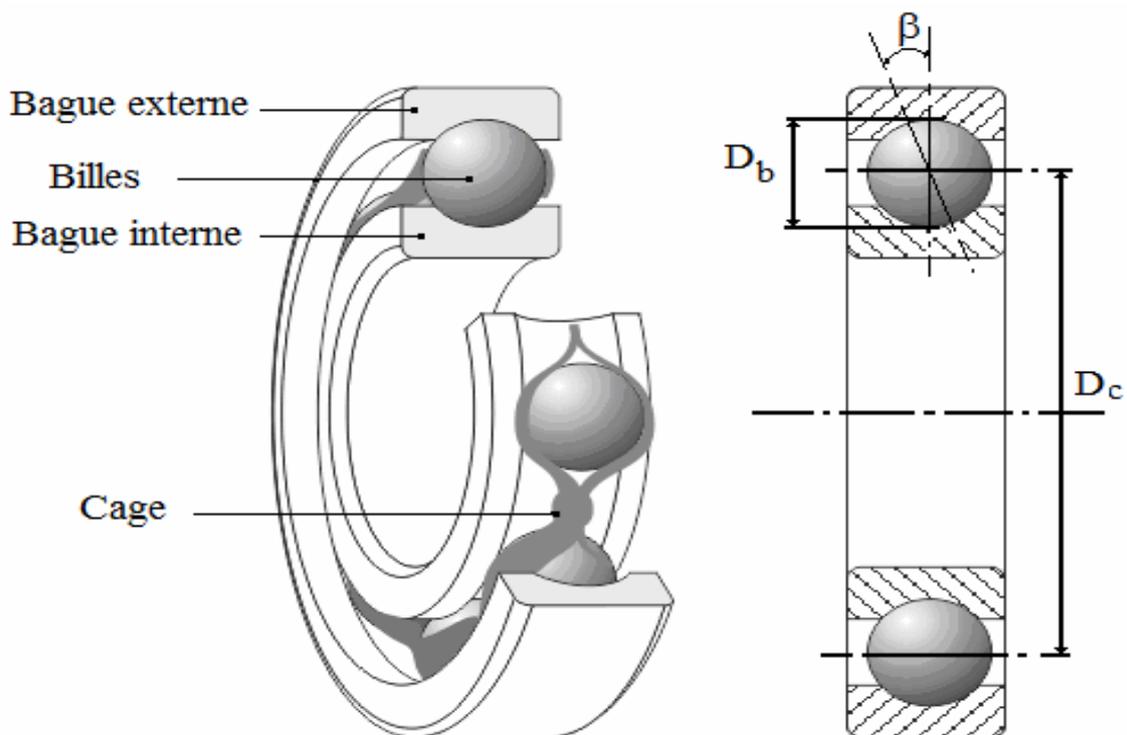


Figure III.18 Géométrie du roulement à billes

Nous présentons ici les résultats de simulations avec les modèles de roulements défectueux introduits dans ce chapitre III. Les simulations ont été effectuées pour une vitesse de 200 rad/s (soit une fréquence mécanique de 23.9 Hz).

Les figures suivantes présentent les spectres de la référence de couple (sortie du correcteur de vitesse) pour les différents défauts roulement considérés.

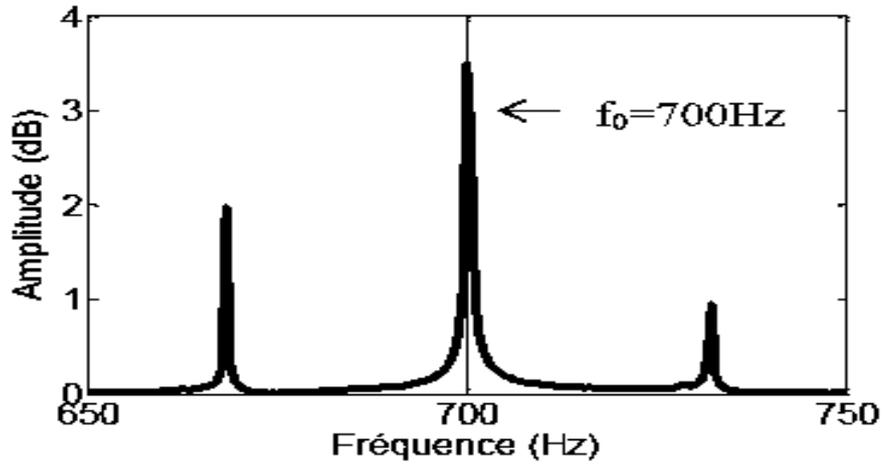


Figure III.19 Spectre de la référence de couple pour un défaut sur la bague externe

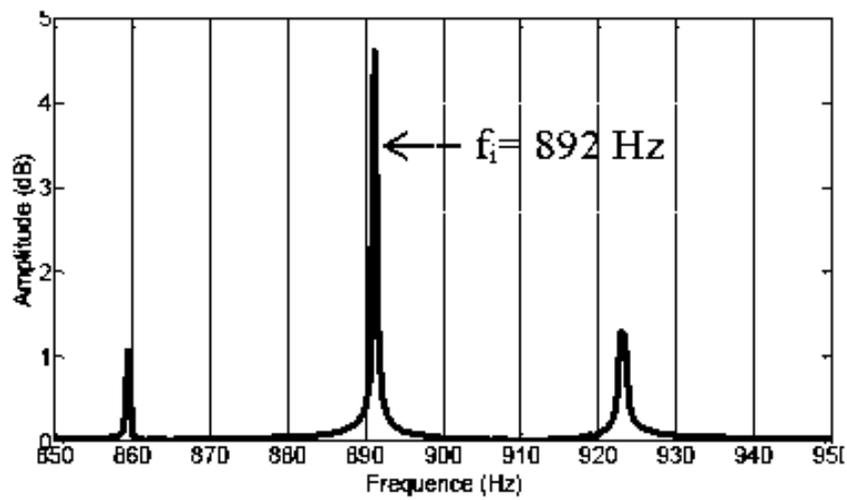


Figure III.20 Spectre de la référence de couple pour un défaut sur la bague interne

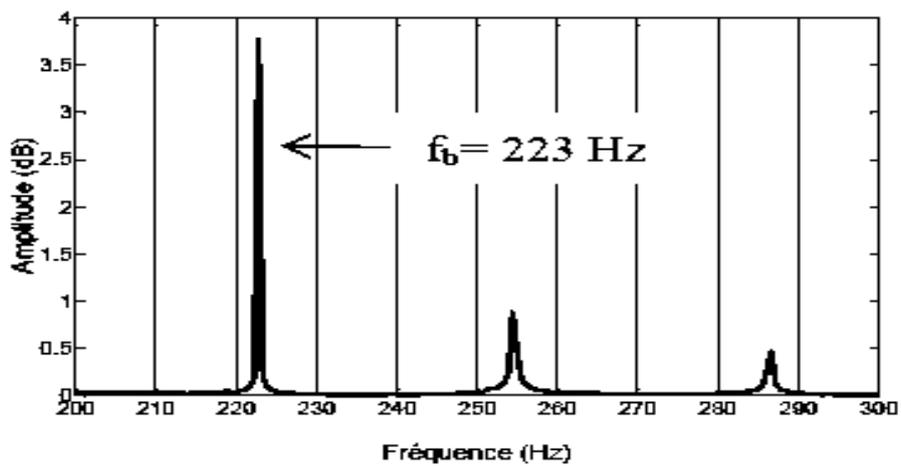


Figure III.21 Spectre de la référence de couple pour un défaut sur la bille

Remarquons que les fréquences caractéristiques des défauts sont en fonction de la vitesse de rotation. Il faudra donc connaître auparavant ces données afin de pouvoir les utiliser pour la détection du défaut éventuel. Ces résultats ont été essentiellement dédiés à la mise en évidence des influences détectables sur la machine asynchrone. Nous avons étudié successivement :

- La signature spectrale du courant statorique de la machine saine,
- Défaut au stator de la machine,
- Défaut au rotor de la machine,
- Comportement défaillant de l'onduleur,
- Effet d'un défaut sur le capteur de vitesse,
- Les défauts de roulement.

Il est bien évident que, dans la pratique, il ne sera pas question de mesurer les courants que dans les barres rotoriques. Les paramètres sur lesquels les mesures peuvent être faites d'une façon assez pratique, c'est les courants de phase statorique. La simulation, dont nous avons présenté a permis de mettre en évidence : l'apparition d'harmoniques supplémentaires (le double de la fréquence électrique sur le capteur de courant,  $kf_e$  sur l'onduleur,  $(1\pm 2g)$  sur le rotor et  $3f_e$  sur le stator). Cette approche peut alors être utilisée dans un premier temps pour établir un premier diagnostic, et être complétée ensuite par l'approche modèle pour avoir une vision plus fine des défauts.

### 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons représenté un modèle mathématique d'un moteur asynchrone afin d'étudier son fonctionnement sans et avec défauts. Le choix d'un tel modèle est imposé par l'objectif de pouvoir simuler les défauts. La caractérisation des défauts a montré l'existence de fréquences caractéristiques des défauts. Ces fréquences peuvent être fixes, variable (fonctions de la vitesse ou de la fréquence fondamentale des courants) sur certaines grandeurs (mesures, sorties du contrôle). L'approche signal, présente un avantage pratique très intéressant, plusieurs techniques ont été abordées pour répondre aux contraintes de fiabilité du diagnostic et de rapidité du traitement. Nous avons, dans un premier temps, présenté les techniques de la phase du spectre. Celle-ci permet de mettre en évidence les composantes de défauts à basses fréquences, quoi qu'elle souffre d'incertitude dans le cas où le signal est pollué d'harmoniques.

## Chapitre 4

---

### Approche modèle

---

## 4.1 Introduction

Dans le contexte de diagnostic, l'estimation de l'état du système est une source de redondance analytique. Elle permet de générer des symptômes de défaillance du système à partir d'un test de cohérence entre des signaux extraits du système qui renseignent sur son comportement réel et des signaux estimés qui traduisent le comportement attendu. Tout écart non permis entre ces signaux révèle la présence éventuelle de défauts affectant le fonctionnement du système, défauts qu'il convient ensuite d'estimer. D'une façon générale, l'estimation de l'état d'un système s'opère par le biais d'un système dynamique auxiliaire, couramment appelé *estimateur d'état* ou *observateur* [NAI-13]. Lorsque les paramètres d'un système sont inconnus ou changent au cours du temps, l'utilisation d'observateurs simples pour l'estimation d'état devient difficile. Cela est dû au fait qu'on doit estimer simultanément l'état et les paramètres du système.

Dans ce cas les observateurs sont les mieux appropriés. Du fait que l'apparition d'un défaut est souvent, interprétée comme étant une variation de l'un des paramètres du système. Des observateurs ont été étudiés dans la littérature (adaptatifs, déterministes, stochastiques). Ils ont démontré leur intérêt pour une détection de défaut au niveau de la machine.

Dans ce chapitre, nous allons présenter quelques méthodes de synthèse d'observateurs de systèmes linéaires et non linéaires, afin de mettre en œuvre une identification des grandeurs non accessible à la mesure d'une machine asynchrone. Nous introduisons le filtre de Kalman comme outil permettant l'estimation et la prédiction de l'état de la machine, à partir de grandeurs mesurables.

## 4.2 Méthodes à base d'observateurs

La conception d'un observateur nécessite la connaissance de certaines informations internes et/ou externes du système (directement disponibles). Ces informations internes sont, dans certains cas, nécessaires pour des raisons : de modélisation (identification), de surveillance (détection de défauts) ou pour la conduite du système (commande). Afin d'avoir un système de conduite performant, il est nécessaire de disposer de toutes ces informations comme le montre la figure IV.1 [BES-07)].

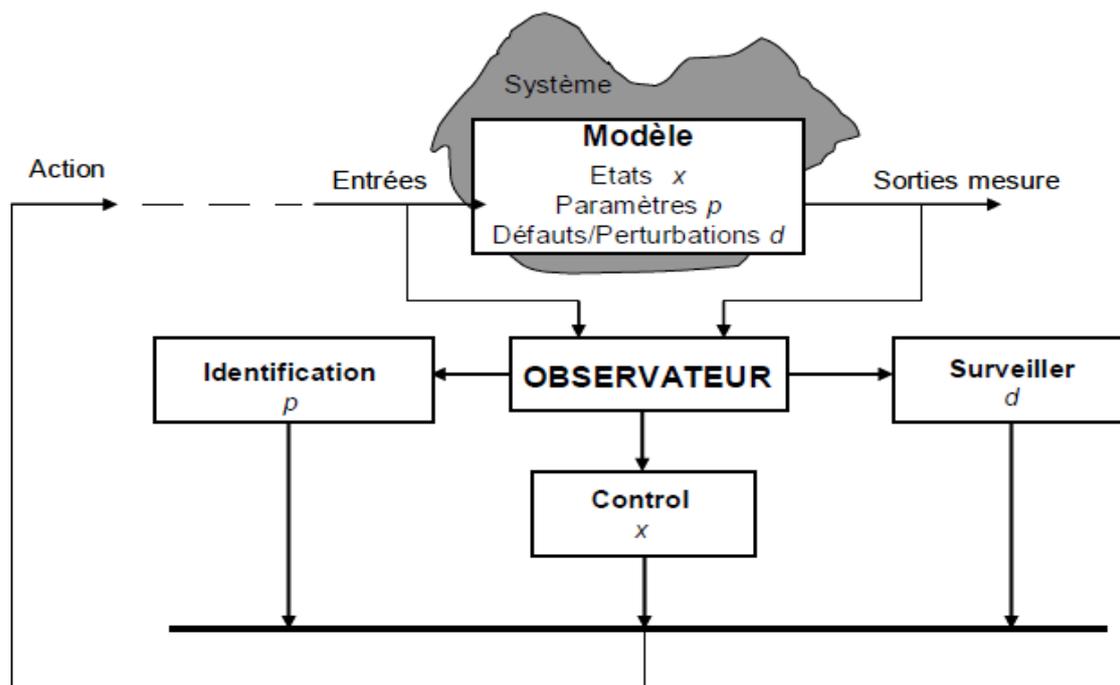


Figure IV.1 Observateur au cœur d'un système de conduite

#### 4.2.1 Différents types d'observateurs

Un observateur est basé sur le modèle du système avec un terme d'adaptation en ligne qui dépend des mesures disponibles ; son but est la reconstruction de l'information. Le modèle est basé sur une représentation d'état du système et nous supposons que toute l'information, qui va être reconstruite, peut être bornée par les variables d'état. Généralement, le modèle considéré peut être en temps continu ou en temps discret, stochastique ou déterministe, de dimension finie ou n finie, régulier ou singulier. Sur la figure IV.2 nous avons représenté les trois principales catégories d'observateurs qui sont : les observateurs stochastiques (filtre DMZ [Yao et Hu (2001)], filtre à particule [Blom et Bloem (2004)]), les observateurs déterministes (observateur à grand gain [Hammouri et al. (1999)], observateur algébrique [Ibrir (2003)], observateur à horizon glissant [Mayne et Michalska (1992)] et observateur intelligent [Schröder (2000)]) et finalement les observateurs adaptatifs (observateur par intervalles [Li et Dahhou (2007)], observateur parallèle [Thein et Misawa (1999)] et observateur multi modèles [Morel et al. (2006) ; Zhang (1999)]).

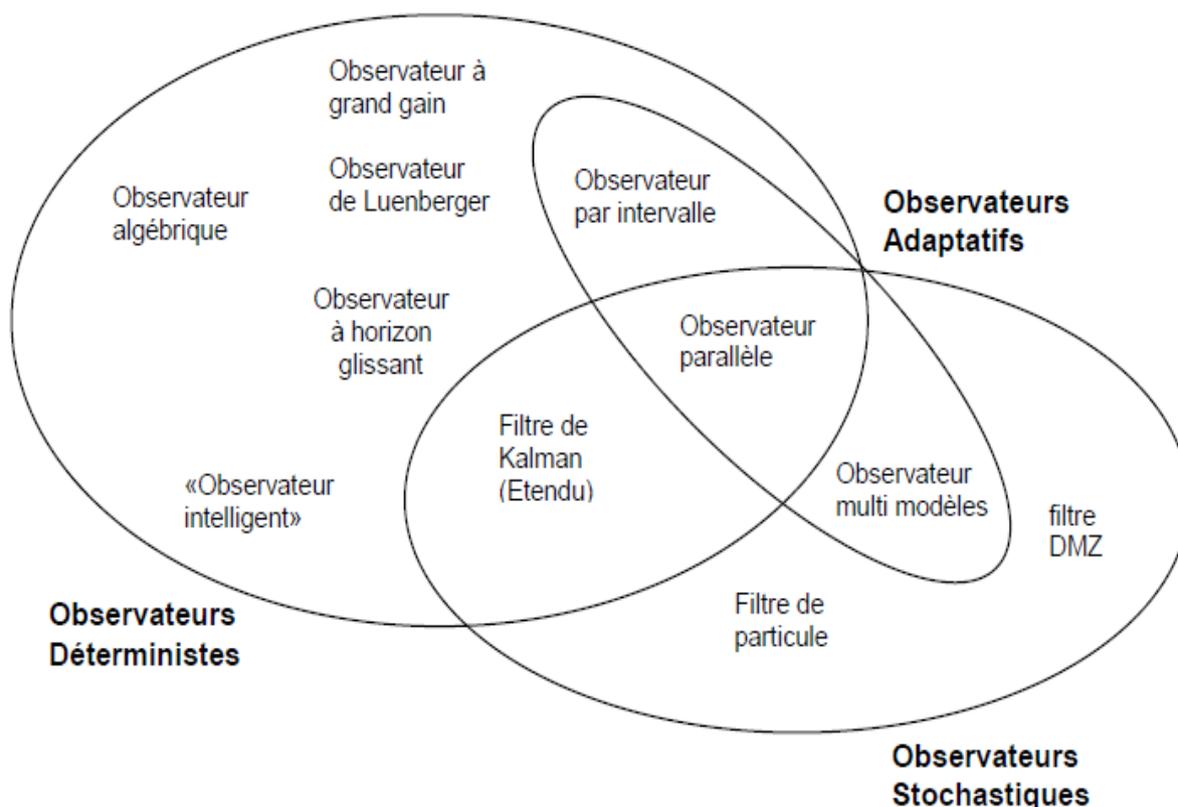


Figure IV.2 Différents types d'observateurs

Dans chaque groupe, il existe plusieurs types d'observateurs, certains observateurs font partie de plusieurs groupes comme le filtre de Kalman (qui se trouve dans la catégorie déterministe et stochastique) ou l'observateur parallèle (qui fait partie de toutes les catégories). Dans ce travail, nous allons considérer que nous disposons d'un modèle sous forme d'état régulier, de dimension finie, déterministe et en temps continu ; nous nous focalisons sur l'étude des observateurs adaptatifs.

### 4.3 Modèle de la machine asynchrone

Le modèle de la machine est établi en considérant des hypothèses simplificatrices, à savoir que la machine est symétrique, fonctionne en régime non saturé et que les différentes pertes sont négligeables [CHA-83]. Le régime dynamique de fonctionnement d'une machine asynchrone est décrit par les équations électromécaniques écrites dans le repère de PARK [YAY-91] comme l'indique la figure IV.3, où toutes les grandeurs étant ramenées à un référentiel statorique. Le choix judicieux du repère, permet une simplification remarquable des expressions des équations différentielles.

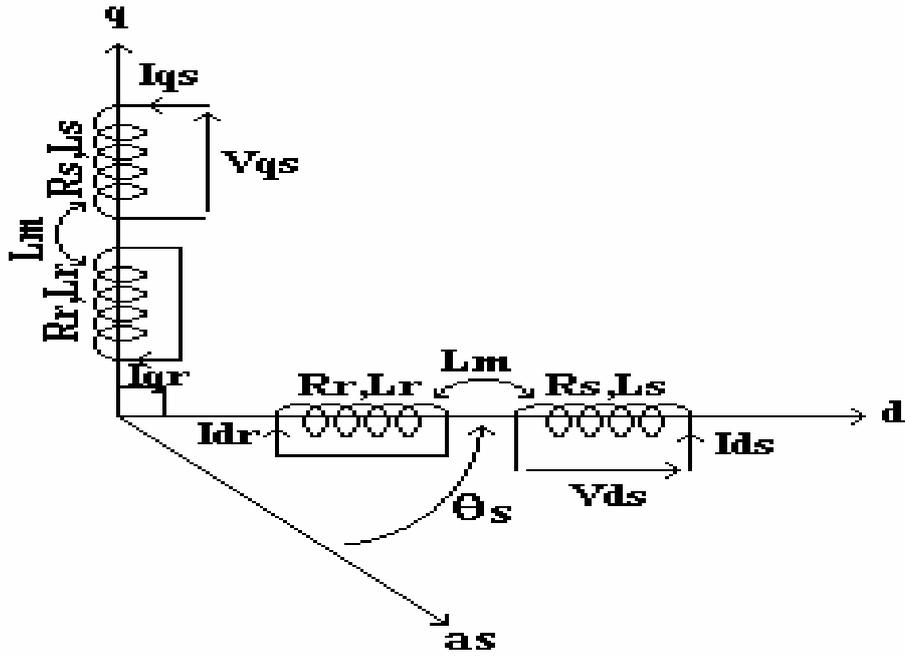


Figure IV.3 Représentation physique de la transformation de PARK pour une machine asynchrone

### 4.3.1 Modèle continu

#### 4.3.1.1 Equations électriques

Dans un référentiel lié au stator, le modèle d'état de la machine asynchrone est défini par les équations suivantes :

$$V_{ds} = (R_s + pL_s)i_{ds} + pL_m i_{dr}$$

$$V_{qs} = (R_s + pL_s)i_{qs} + pL_m i_{qr} \quad (IV.1)$$

$$0 = pL_m i_{ds} + w_r L_m i_{qs} + (R_r + pL_r)i_{dr} + w_r L_m i_{qr}$$

$$0 = -w_r L_m i_{ds} + pL_m i_{qs} - w_r L_m i_{dr} + (R_r + pL_r)i_{qr}$$

La notation matricielle du modèle d'état est donnée par :

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + Bu(t): \text{ On note } \dot{X}(t) = pX(t) \quad (IV.2)$$

Le développement des calculs conduit à:

$$\begin{bmatrix} p i_{ds} \\ p i_{qs} \\ p i_{dr} \\ p i_{qr} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} -R_s L_r & L_m^2 w_r & L_m R_r & L_m L_r w_r \\ L_m^2 w_r & -R_s L_r & -L_m L_r w_r & L_m R_r \\ L_m R_s & -L_m L_s w_r & -R_r L_s & -L_s L_r w_r \\ L_m L_s w_r & L_m R_s & L_s L_r w_r & -R_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \\ -L_m & 0 \\ 0 & -L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} \quad (IV.3)$$

Selon la définition du modèle de PARK, le vecteur d'entrée  $u$  est constitué des tensions statoriques  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$ . Nous avons choisi pour le vecteur d'état  $X$ , les deux courants statoriques  $i_{ds}, i_{qs}$  et les deux courants rotoriques non accessibles à la mesure  $i_{dr}, i_{qr}$ .

#### 4.3.1.2 Equations mécaniques

Les équations mécaniques liants la vitesse au couple sont données par :

$$\begin{cases} C_e = \frac{3}{2} n p L_m (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \\ J \frac{d\Omega_r}{dt} + f \Omega_r = C_e - C_r \end{cases} \quad (IV.4)$$

### 4.4 Modèle stochastique

La machine asynchrone ne peut pas être représentée parfaitement par un modèle déterministe, par conséquent il est nécessaire d'introduire les différentes sources d'incertitudes qui sont modélisées par des bruits dans le modèle linéaire:

$$X(k+1) = F(k)X(k) + G(k)u(k) + W(k) \quad (IV.5)$$

$$Y(k) = C(k)X(k) + V(k) \quad (IV.6)$$

$W(k)$  définit les bruits d'état, bruits d'erreurs de modélisation sur les fonctions  $F$  et  $G$ .  $V(k)$  définit le bruit d'observation, bruits de mesure et erreurs de modélisation sur la fonction  $C$ . Ces bruits sont respectivement caractérisés par leurs matrices de covariance  $Q$  et  $R$  définies comme suit :

$$\begin{cases} E[W_k W_i^T] = Q * \delta_{ki} \\ E[V_k V_i^T] = R * \delta_{ki} \end{cases} \quad (IV.7)$$

#### 4.4.1 Le modèle ' bon fonctionnement' pour le contrôle et la surveillance

Des modèles sont nécessaires pour concevoir et affiner les contrôleurs. Ils sont communément équilibrés. On passe du référentiel (abc) fixe, au référentiel fixe ( $\alpha, \beta$ ) par la transformation de Concordia [FIS-96].

$$\begin{cases} pX = A_c X + B_c U \\ Y = C_c X \end{cases} \quad (IV.8)$$

$$\text{Avec } X = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta} \ \varphi_{r\alpha} \ \varphi_{r\beta}]^T$$

Où:

$$A_c = \begin{bmatrix} -\gamma & 0 & \frac{K}{\tau} & K\omega \\ 0 & -\gamma & -K\omega & \frac{K}{\tau} \\ \frac{L_m}{\tau} & 0 & -\frac{1}{\tau} & -\omega \\ 0 & \frac{L_m}{\tau} & \omega & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \quad B_c = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad C_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

et  $\gamma = \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma\tau}$ ,  $\tau = \frac{L_r}{R_r}$ ,  $K = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}$ ,  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$

#### 4.4.2 Modèle discret de la machine asynchrone

Nous développons dans ce paragraphe un modèle discret de la machine asynchrone afin de pouvoir utiliser ces équations dans le développement de filtre de Kalman. Nous considérons en effet que les équations de l'observateur à des fins de diagnostic seront forcément utilisées dans un système à base de microprocesseur ou autre et donc entrer sous forme d'un modèle discret.

La version discrète est obtenue en utilisant la formule d'Euler :

$$\begin{cases} \frac{X(k+1)-X(k)}{T_s} = A_c X(k) + B_c U(k) \\ y(k) = C_d X(k) \end{cases} \quad \text{d'où} \quad \begin{cases} X(k+1) = (T_s A_c + I)X(k) + T_s B_c U(k) \\ y(k) = C_c X(k) \end{cases}$$

Où bien:

$$\begin{cases} X(k+1) = A_d X(k) + B_d X(k) \\ y(k) = C_d X(k) \end{cases} \quad \text{avec} \quad A_d = I + A_c T_s, B_d = B_c T_s, C_c = C_d$$

### 4.5 Surveillance de la machine par des observateurs

La commande vectorielle des machines à induction nécessite l'utilisation d'observateurs [LEO-85]. Ces observateurs sont sensés fonctionner dans le contexte d'un système sans défaut, il est donc préférable d'étudier le comportement de ces observateurs, de fournir des informations pour la détection et localisation des défauts par le suivi des paramètres estimés [ISE-97].

#### 4.5.1 La théorie du filtre de Kalman

Le filtre de Kalman est une méthode visant à estimer des paramètres d'un système évoluant dans le temps à partir de mesures bruitées. On retrouve ce filtre dans bon nombre de domaines relatifs au traitement du signal, radar, traitement d'images etc., la force de ce filtre est sa capacité de prédiction des paramètres et de rectification des erreurs, non seulement des capteurs, mais aussi du modèle lui-même [ATK-91].

En effet, pour appliquer un filtre de Kalman, il faut avant tout modéliser le système pour lequel on veut estimer les paramètres, de manière linéaire. (Des variantes du filtre de Kalman existent pour la prise en compte de modèles non linéaires). Dans une méthode d'estimation classique (par exemple, la méthode des moindres carrés), une simple erreur dans la modélisation du système entraîne inévitablement une erreur au niveau de l'estimation. La force du filtre de Kalman est d'intégrer un terme d'imprécision sur le modèle lui-même, ce qui lui permet de donner des estimations correctes malgré les erreurs de modélisation.

Un autre point fort du filtre de Kalman (mais que l'on retrouve aussi dans la méthode des moindres carrés par exemple) est sa capacité à déterminer l'erreur moyenne de son estimation. En effet, l'outil Kalman fournit un vecteur contenant les paramètres estimés, mais aussi une matrice de covariance, cette matrice nous renseigne donc sur la précision de l'estimation, ce qui peut être utile dans de nombreuses applications. Un autre atout du filtre de kalman est que la convergence de cette erreur est garantie [LOR-98].

Le fonctionnement du filtre de Kalman peut se diviser en deux étapes :

- Une première étape de prédiction de l'estimation selon le modèle du système. Pour ce faire, le filtre de Kalman reprend l'estimation précédente des paramètres et de l'erreur et prédit les nouveaux paramètres et la nouvelle erreur en fonction de la modélisation du système.
- La seconde étape va faire la mise à jour de cette prédiction grâce aux nouvelles mesures. Ces mesures (par définition bruitées) vont permettre d'obtenir une estimation des paramètres et de l'erreur à partir de la prédiction faite. Si jamais le modèle comporte des erreurs, cette étape de mise à jour permettra de les rectifier.

#### 4.5.2 Equations de synthèse d'un observateur de Kalman particulier

A partir des équations d'état de la machine dans le référentiel de Concordia, les équations d'un observateur d'état de la machine s'écrivent :

$$p\hat{x} = \hat{A}_c\hat{X} + \hat{B}_cU + G_c\hat{c}_c(\hat{Y} - Y) \quad (\text{IV.9})$$

L'accent circonflexe sur les matrices d'état de l'observateur traduit la différence pouvant exister entre les matrices de la machine et celles de l'observateur.

##### 4.5.2.1 Equations de base

Pour établir les équations du filtre de Kalman, nous créons un modèle discret de la machine dans le référentiel de Concordia. Comme précédemment, la discrétisation est obtenue par une approximation au premier ordre du développement de l'exponentielle de matrice : les équations d'état du système d'état du système discret sont les suivantes [ATK-91] :

$$\begin{cases} x(k+1) = A_d x(k) + B_d U(k) + w(k) \\ y(k) = C_d x(k) + v(k) \end{cases} \quad (\text{IV.10})$$

$$\text{Avec } A_d = I + A_c T_s, B_d = B_c T_s, C_d = C_c \quad (\text{IV.11})$$

$W(k)$  et  $v(k)$  correspondent au modèle stochastique des perturbations ajoutées à l'état et à la sortie.

Le bruit du procédé  $w(k)$  est caractérisé par :

$$\begin{cases} E\{w(k)\} = 0 \\ E\{w(k)v(k)^T\} = Q \end{cases} \quad (\text{IV.12})$$

La matrice  $Q$  est définie positive.

Le bruit de mesure  $v(k)$  est caractérisé par :

$$\begin{cases} E\{v(k)\} = 0 \\ E\{v(k)v(k)^T\} = R \end{cases} \quad (\text{IV.13})$$

La matrice  $R$  est elle aussi définie positive.

Si nous appelons  $P$  la matrice de covariance de l'erreur d'estimation, cette matrice est obtenue à partir de :  $p(k/k) = E\{(x(k) - \hat{x}(k))(x(k) - \hat{x}(k))^T\}$

Dans la suite, la notation  $k/k$  correspond à une prédiction à l'instant  $k$  à partir de données jusqu'à l'instant  $k$  (covariance a priori) et  $k+1/k$  correspond à une prédiction à l'instant  $k+1$  à partir des données jusqu'à l'instant  $k$  (covariances a posteriori) [LOR-98].

A chaque pas d'intégration, les équations à résoudre sont alors :

1/ Calcul des états de l'observateur

$$\hat{x}(k+1/k) = A_d(k)\hat{x}(k/k) + B_d U(k) \quad (\text{IV.14})$$

2/ Calcul de la matrice de covariance à posteriori  $P(k+1/k)$

$$P(k+1/k) = A_d(k)P(k/k)A_d^T(k) + Q \quad (\text{IV.15})$$

3/ Calcul des sorties du filtre

$$\hat{x}(k+1/k+1) = \hat{x}(k+1/k) + G_d(k+1) \cdot [y(k+1) - C_d \hat{x}(k+1/k)] \quad (\text{IV.16})$$

4/ Calcul de la matrice gain de rebouclage

$$G_d(k+1) = P(k+1/k)C_d(k+1)^T \cdot [C_d(k)P(k+1/k)C_d(k)^T + R]^{-1} \quad (\text{IV.17})$$

5/ Calcul de la matrice de covariance a priori  $P(k+1/k+1)$

$$P(k+1/k+1) = P(k+1) - G_d(k+1)C_d(k+1)P(k+1/k) \quad (\text{IV.18})$$

Nous considérons que les matrices Q et R sont constantes mais elles peuvent évoluer dans le temps. Le comportement et la stabilité du filtre de Kalman sont fonctions de Q et de R.

## 4.6 Le filtre de Kalman étendu

### 4.6.1 Synthèse de filtre de Kalman étendu

La surveillance de la machine consiste à estimer la résistance statorique. C'est pourquoi nous considérons dans les équations du filtre de Kalman un nouvel état constitué par cette résistance. L'équation d'état correspondante est  $\dot{R}_s = 0$ . Le modèle d'état étendu est alors :

$$\begin{cases} x(k+1) = A_d x(k) + B_d U(k) + w(k) \\ y(k) = C_d x(k) + v(k) \end{cases} \quad (\text{IV.19})$$

$$\text{Où } x = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad \varphi_{r\alpha} \quad \varphi_{r\beta} \quad R_s]$$

Les équations du filtre de Kalman étendu sont déduites de celles du filtre de Kalman. La matrice d'état discrète  $A_d$  est remplacée par la matrice jacobienne de la fonction non-linéaire F:

$$J = \left. \frac{\partial f}{\partial x(k)} \right|_{\hat{x}(k), U(k)} \quad (\text{IV.20})$$

La matrice  $J$  est définie comme suit :

$$J = \begin{bmatrix} 1 - \gamma T_s & 0 & \frac{K}{\tau} T_s & K\omega T_s & -\frac{1}{\sigma L_s} T_s \hat{I}_{sd} \\ 0 & 1 - \gamma T_s & -K\omega T_s & 0 & -\frac{1}{\sigma L_s} T_s \hat{I}_{sq} \\ \frac{L_m}{\tau} T_s & 0 & 1 - \frac{T_s}{\tau} & -\omega T_s & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{\tau} T_s & \omega T_s & 1 - \frac{T_s}{\tau} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Il est donc envisageable d'étendre le filtre de Kalman à tous les paramètres de la machine puisqu'il est toujours possible de déterminer la matrice jacobienne (avec plus ou moins de calculs). L'estimation de résistance rotorique a aussi été envisagée comme moyen de surveillance.

## 4.7 Modèle des défauts pour la synthèse des observateurs

### 4.7.1 Machine

Nous avons besoin d'intégrer dans ces modèles des termes permettant de prendre en compte les défauts. Cependant, afin de pouvoir utiliser des observateurs linéaires, les défauts considérés doivent être modélisés de manière additive. Cela nous impose de considérer uniquement des variations de résistances dans la matrice A de l'équation d'état, qui s'écrit alors sous la forme :

$$A_d = A_c + \Delta A \quad (IV.21)$$

avec :  $A_d$  = matrice d'état avec le défaut

$A_c$  = matrice d'état sans défaut

$\Delta A$  = matrice traduisant l'effet du défaut considéré

Les autres matrices sont donc inchangées. Par la suite, les matrices de défauts proposées sont établies à partir du modèle de la machine dans le référentiel de Park.

#### 4.7.2 Défaut rotor

On représente le défaut sous la forme de l'équation (IV.2) et (IV.3).

Avec :

$$\begin{bmatrix} p i_{ds} \\ p i_{qs} \\ p i_{dr} \\ p i_{qr} \end{bmatrix} = p X(t), \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = X(t), \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = u(t),$$

$$A(t) = \frac{1}{\sigma L_S L_r} \begin{bmatrix} -R_S L_r & L_m^2 w_r & L_m R_r & L_m L_r w_r \\ L_m^2 w_r & -R_S L_r & -L_m L_r w_r & L_m R_r \\ L_m R_S & -L_m L_S w_r & -R_r L_S & -L_S L_r w_r \\ L_m L_S w_r & L_m R_S & L_S L_r w_r & -R_r L_S \end{bmatrix}, B = \frac{1}{\sigma L_S L_r} \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \\ -L_m & 0 \\ 0 & -L_m \end{bmatrix}$$

Pour un changement  $\Delta R_R$  de la résistance  $R_R$ , La matrice de défaut s'écrit: la matrice  $A$  deviendrai  $A'$  et  $R_R$  deviendrai  $R'_R$  comme suit :

$$R'_R = \Delta R_R + R_R$$

$$A' = \frac{1}{\sigma L_S L_r} \begin{bmatrix} -R_S L_r & L_m^2 w_r & L_m R'_r & L_m L_r w_r \\ L_m^2 w_r & -R_S L_r & -L_m L_r w_r & L_m R'_r \\ L_m R_S & -L_m L_S w_r & -R'_r L_S & -L_S L_r w_r \\ L_m L_S w_r & L_m R_S & L_S L_r w_r & -R'_r L_S \end{bmatrix}$$

$$A' = \frac{1}{\sigma L_S L_r} \begin{bmatrix} -R_S L_r & L_m^2 w_r & L_m (\Delta R_r + R_r) & L_m L_r w_r \\ L_m^2 w_r & -R_S L_r & -L_m L_r w_r & L_m (\Delta R_r + R_r) \\ L_m R_S & -L_m L_S w_r & -(\Delta R_r + R_r) L_S & -L_S L_r w_r \\ L_m L_S w_r & L_m R_S & L_S L_r w_r & -(\Delta R_r + R_r) L_S \end{bmatrix}$$

$$\Delta A_R = A' - A$$

$$\begin{aligned}
 \Delta A_R &= -\frac{1}{\sigma L_S L_r} \begin{bmatrix} -R_S L_r & L_m^2 W_r & L_m R_r & L_m L_r W_r \\ L_m^2 W_r & -R_S L_r & -L_m L_r W_r & L_m R_r \\ L_m R_S & -L_m L_S W_r & -R_r L_S & -L_S L_r W_r \\ L_m L_S W_r & L_m R_S & L_S L_r W_r & -R_r L_S \end{bmatrix} \\
 &\quad + \frac{1}{\sigma L_S L_r} \begin{bmatrix} -R_S L_r & L_m^2 W_r & L_m(\Delta R_r + R_r) & L_m L_r W_r \\ L_m^2 W_r & -R_S L_r & -L_m L_r W_r & L_m(\Delta R_r + R_r) \\ L_m R_S & -L_m L_S W_r & -(\Delta R_r + R_r)L_S & -L_S L_r W_r \\ L_m L_S W_r & L_m R_S & L_S L_r W_r & -(\Delta R_r + R_r)L_S \end{bmatrix} \\
 \Delta A_R &= -\frac{1}{\sigma L_S L_r} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\Delta R_r L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\Delta R_r L_m \\ 0 & 0 & \Delta R_r L_S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta R_r L_S \end{bmatrix} \\
 \Delta A_R &= -\frac{1}{\sigma L_S L_r} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_m \\ 0 & 0 & L_S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_S \end{bmatrix} \Delta R_r \tag{IV.22}
 \end{aligned}$$

### 4.7.3 Défaut stator

Dans le cas pour un changement  $\Delta R_S$  de la résistance  $R_S$ , la matrice  $A$  deviendrai  $A''$  et  $R_S$  deviendrai  $R'_S$  comme suit :

$$R'_S = \Delta R_S + R_S$$

$$\begin{aligned}
 A'' &= \frac{1}{\sigma L_S L_r} \begin{bmatrix} -R'_S L_r & L_m^2 W_r & L_m R_r & L_m L_r W_r \\ L_m^2 W_r & -R'_S L_r & -L_m L_r W_r & L_m R_r \\ L_m R'_S & -L_m L_S W_r & -R_r L_S & -L_S L_r W_r \\ L_m L_S W_r & L_m R'_S & L_S L_r W_r & -R_r L_S \end{bmatrix} \\
 A'' &= \frac{1}{\sigma L_S L_r} \begin{bmatrix} -(\Delta R_S + R_S)L_r & L_m^2 W_r & L_m R_r & L_m L_r W_r \\ L_m^2 W_r & -(\Delta R_S + R_S)L_r & -L_m L_r W_r & L_m R_r \\ L_m(\Delta R_S + R_S) & -L_m L_S W_r & -R_r L_S & -L_S L_r W_r \\ L_m L_S W_r & L_m(\Delta R_S + R_S) & L_S L_r W_r & -R_r L_S \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\Delta A_S = A'' - A$$

$$\begin{aligned}
 \Delta A_S &= \frac{1}{\sigma L_S L_r} \begin{bmatrix} -(\Delta R_S + R_S)L_r & L_m^2 w_r & L_m R_r & L_m L_r w_r \\ L_m^2 w_r & -(\Delta R_S + R_S)L_r & -L_m L_r w_r & L_m R_r \\ L_m(\Delta R_S + R_S) & -L_m L_S w_r & -R_r L_S & -L_S L_r w_r \\ L_m L_S w_r & L_m(\Delta R_S + R_S) & L_S L_r w_r & -R_r L_S \end{bmatrix} \\
 &\quad - \frac{1}{\sigma L_S L_r} \begin{bmatrix} -R_S L_r & L_m^2 w_r & L_m R_r & L_m L_r w_r \\ L_m^2 w_r & -R_S L_r & -L_m L_r w_r & L_m R_r \\ L_m R_S & -L_m L_S w_r & -R_r L_S & -L_S L_r w_r \\ L_m L_S w_r & L_m R_S & L_S L_r w_r & -R_r L_S \end{bmatrix} \\
 \Delta A_S &= \frac{1}{\sigma L_S L_r} \begin{bmatrix} -(\Delta R_S)L_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(\Delta R_S)L_r & 0 & 0 \\ L_m(\Delta R_S) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m(\Delta R_S) & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 \Delta A_S &= -\frac{1}{\sigma L_S L_r} \begin{bmatrix} L_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_r & 0 & 0 \\ -L_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & 0 \end{bmatrix} \Delta R_S \tag{IV.23}
 \end{aligned}$$

#### 4.7.4 Défaut capteur

Le défaut réel conduit, dans le référentiel de Park, à des changements des valeurs  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  qui comportent des composantes continue et alternative.

On représente le défaut sous la forme suivante :

$$Y_d = Y + \Delta I \tag{IV.24}$$

Avec :

$Y_d$  = vecteur de sortie avec le défaut

$Y$  = vecteur de sortie sans défaut

$\Delta I$  = vecteur traduisant l'effet du défaut capteur

Où:

$$\Delta I = \begin{bmatrix} \Delta i_{sd} \\ \Delta i_{sq} \end{bmatrix} \tag{IV.25}$$

#### 4.7.5 Défaut onduleur

On représente le défaut sous la forme additive suivante

$$U_d = U + \Delta U \tag{IV.26}$$

Avec:

$U_d$  = vecteur d`entrée avec le défaut

$U$  = vecteur d`entrée sans défaut

$\Delta U$  = vecteur traduisant l`effet du défaut de tension

Où:

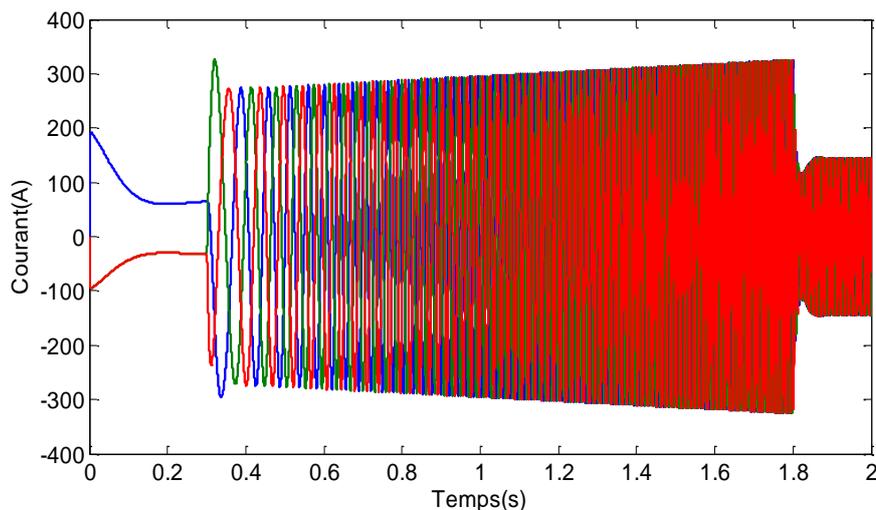
$$\Delta U = \begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_q \end{bmatrix} \quad (\text{IV.27})$$

## 4.8 Résultats de simulation

### 4.8.1 Sans défaut

Notre but de cette simulation est de voir la réaction de la machine asynchrone en mode sain et avec défaut électrique (rotor, stator, onduleur) dans le régime transitoire et permanent, après on va introduire un observateur à la sortie de la machine (filtre de Kalman étendu) et voir sa réaction. Les résultats sont issues de la résistance rotorique, le courant statorique et sa transformée rapide (FFT).

La figure suivante présente l'allure du courant dans une phase de la machine asynchrone. On peut y distinguer les différentes phases liées à la commande du système : phase de fluxage, phase d'application de la consigne du couple liée à la rampe en vitesse, puis stabilisation de la vitesse et de la consigne de couple. Jusqu'à 0.3 seconde, les tensions appliquées ont pour but de positionner le vecteur flux dans la machine, à partir de cet instant, une consigne de couple est appliquée à la commande et la vitesse croit.



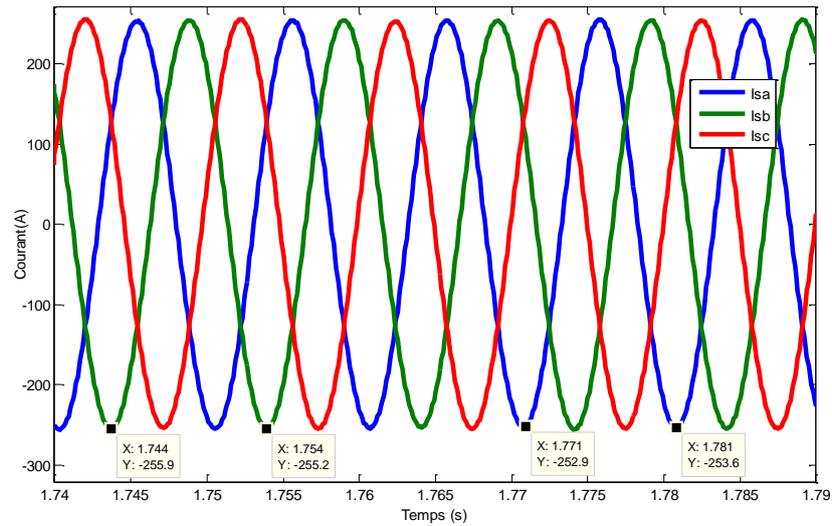


Figure IV.4 Courants statoriques de la phase a de la machine sain

La figure suivante présente l’allure du flux stator suivant l’axe alpha. On trouve bien la phase de fluxage ainsi que l’évolution du flux en fonction de l’augmentation de la vitesse de rotation de la machine et donc de la fréquence des tensions d’alimentation.

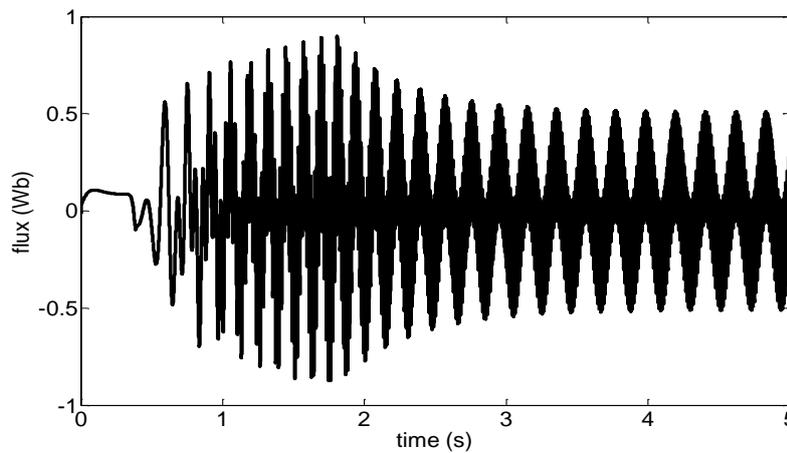


Figure IV.5 Flux statorique de la machine

La figure suivante présente l’évolution du couple produit par la machine asynchrone. On trouve la phase d’accélération (avec un dépassement lié à la commande en vitesse) et la phase de stabilisation de la vitesse et donc du couple.

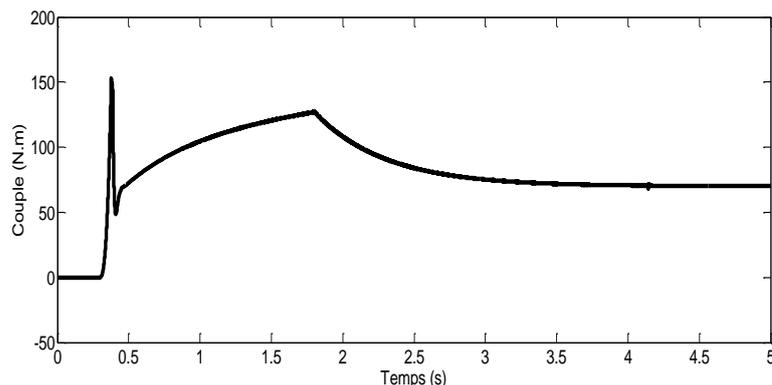


Figure IV.6 Couple de la machine

La figure suivante présente l'allure de la vitesse du système. On y retrouve bien les différentes phases que l'on décrit précédemment.

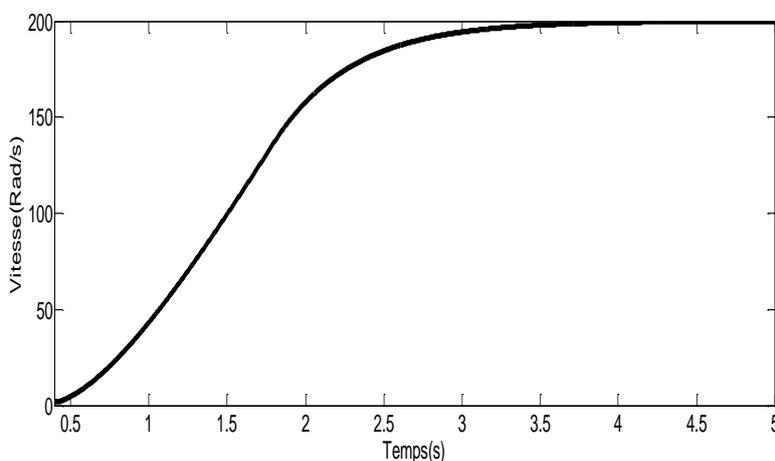


Figure IV.7 Vitesse de la machine

La figure suivante présente l'allure de la résistance rotorique en sortie du filtre de kalman (pour un système sain). On constate une dérive de la résistance rotorique en fonction de la vitesse. Cette dérive a été corrigée : suivant la vitesse, on compense le paramètre estimé afin qu'il soit plus proche de la valeur attendue. Cette compensation à la forme d'une relation linéaire entre la dérive de la résistance rotorique et la vitesse.

Dans le domaine de l'estimation des paramètres des machines électriques à courants alternatifs, beaucoup des méthodes ont été proposées. Selon des considérations sur les différentes perturbations, ces méthodes peuvent être déterministes ou stochastiques. Les premières ne font pas d'hypothèse sur les propriétés des bruits, tandis que les secondes tiennent compte des bruits de perturbation du système. Parmi les méthodes stochastiques, nous avons, le filtrage de Kalman. Pour la détection des défauts, dans l'approche à base de modèles paramétriques, on ne génère pas réellement un vecteur de résidus, mais des estimés de vecteurs représentant des défauts dans le système surveillé [NAN-90], [BOU-01].

L'estimation de la résistance rotorique est efficace, et converge très rapidement vers la valeur nominale de la résistance rotorique.

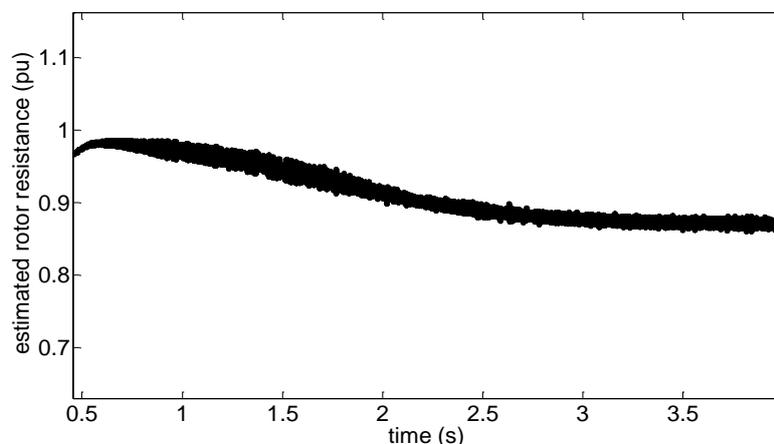


Figure IV.8 Estimation de la résistance rotorique par le filtre de Kalman sans compensation

La figure suivante présente l'allure de la résistance rotorique avec compensation de la dérive en fonction de la vitesse.

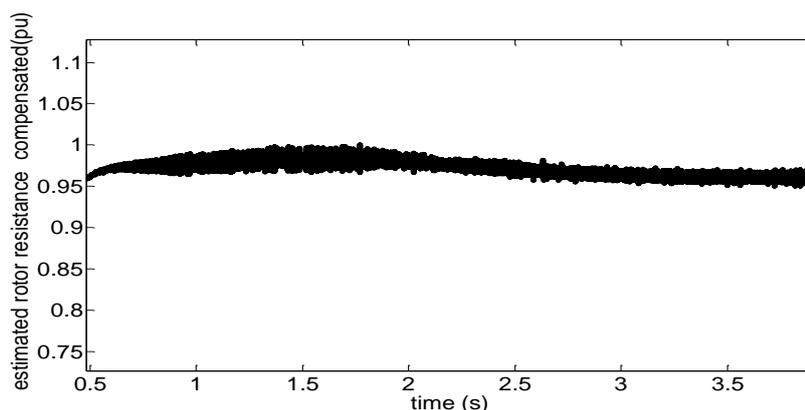


Figure IV.9 Estimation de la résistance rotorique par le filtre de Kalman avec compensation

#### 4.8.2 Défaut au rotor

La figure IV-10 présente l'allure du courant statorique, notons l'apparition des raies dans le spectre du courant. Le défaut au rotor se caractérise par l'apparition de deux fréquences  $(1 \pm 2g)$  ou  $g$  représente le glissement (92,2Hz et 107Hz) autour de la fréquence électrique  $f$  électrique (100Hz). Si on fait la FFT de ce signal, ce défaut sera très difficile à détecter dans le spectre du courant car l'amplitude de la raie à la fréquence fondamentale est très importante par rapport à celle de la raie recherchée et ces raies sont à une fréquence encadrent la raie au fondamental avec une différence liée au glissement (en général très faible).

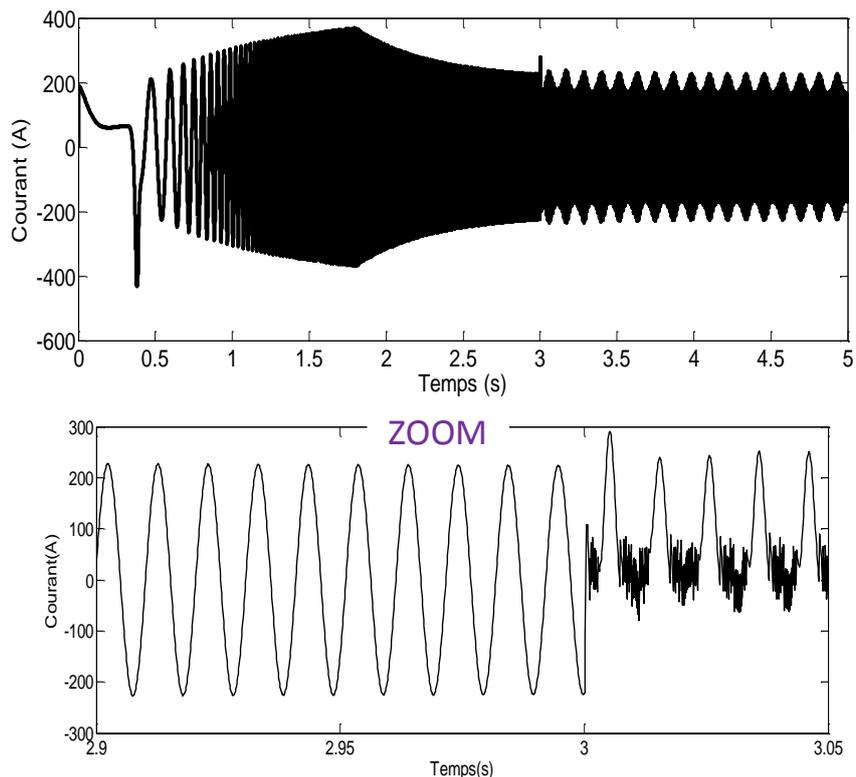


Figure IV.10 Courant statorique de la machine en défaut au rotor

La figure suivante présente l'allure de la résistance estimée pour un défaut déséquilibré au rotor. Notant cependant que l'estimation de la résistance rotorique est affectée à l'instant  $t=3$  seconde (temps de l'application de défaut) d'où l'apparition des oscillations à basse fréquence. Cette existence de la fréquence permet alors sur la base de la résistance rotor estimée de caractériser que c'est bien un défaut au rotor.

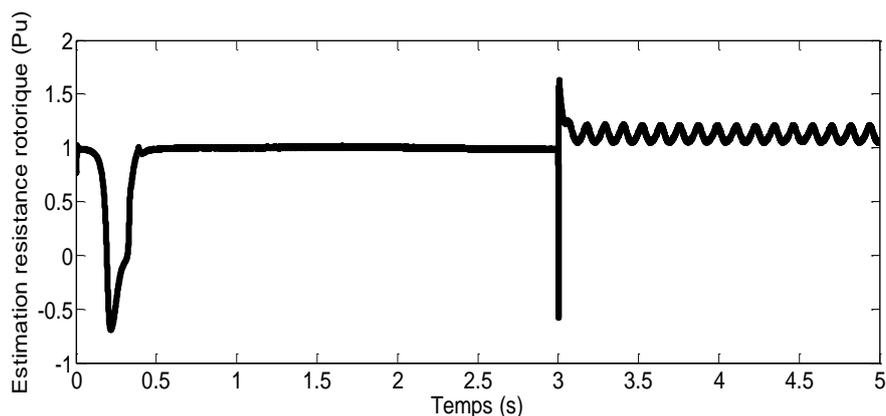


Figure IV.11 Résistance rotorique estimée lors d'un défaut au rotor

### 4.8.3 Défaut au stator

La figure IV.12 présente l'allure du courant statorique stator. Notons l'apparition de la fréquence qui caractérise le défaut qui est trois fois la fréquence électrique (300Hz). L'apparition des raies dans le spectre du courant est due à l'application du défaut à l'instant  $t=3$ seconde, il est facile de détecter la fréquence qui caractérise le défaut en basse fréquence. (Voir figure ci-dessous après le FFT du courant statorique de phase).

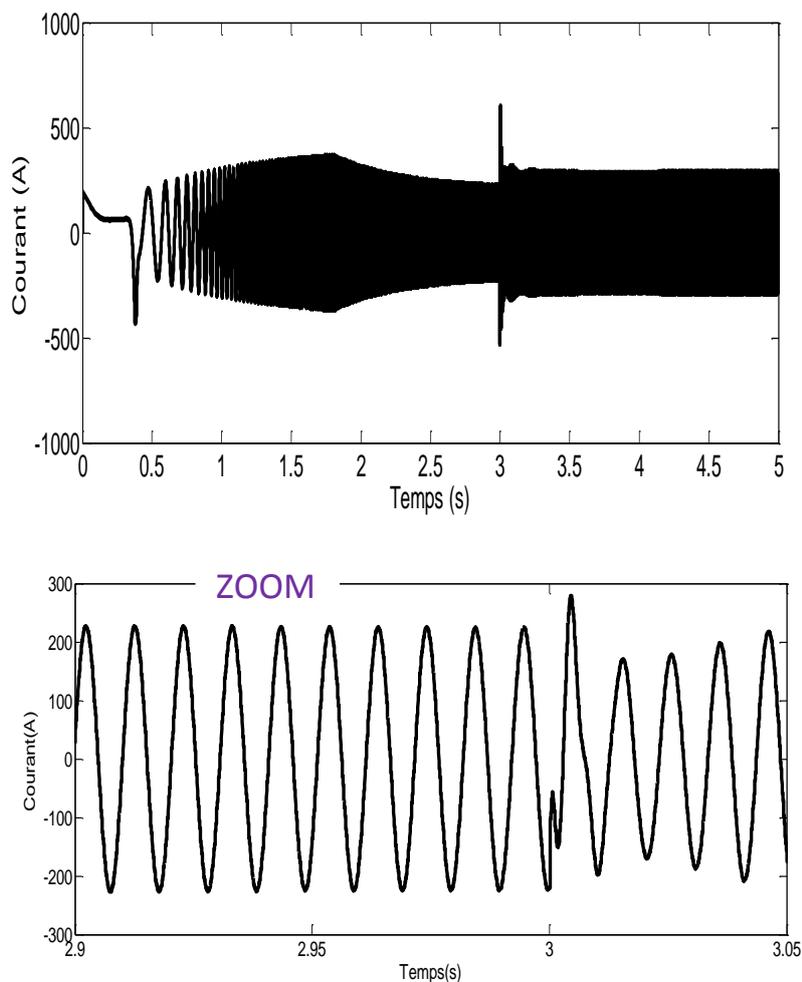
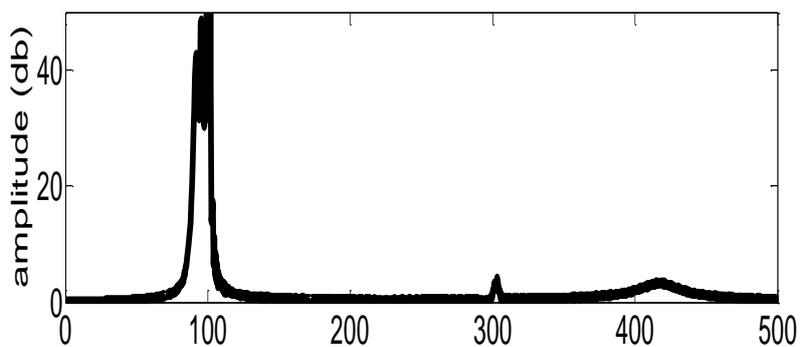


Figure IV.12 Courant statorique de la machine en défaut au stator



FigureIV.13FFT du courant statorique de la phase

La figure suivante présente le courant de la phase en sortie de la machine et le courant pour la même phase en sortie de l'observateur, il faut préciser que les deux courants (mesuré et estimé) sont similaires. L'observateur a donc modifié la grandeur résistance rotorique pour que les deux courants soient 'identiques'. L'erreur qui existe entre les deux courants s'explique par le fait que l'observateur est un système discret : il fait donc les calculs des grandeurs sur la base des mesures effectuées au temps précédent. Ceci explique la légère erreur de trainage.

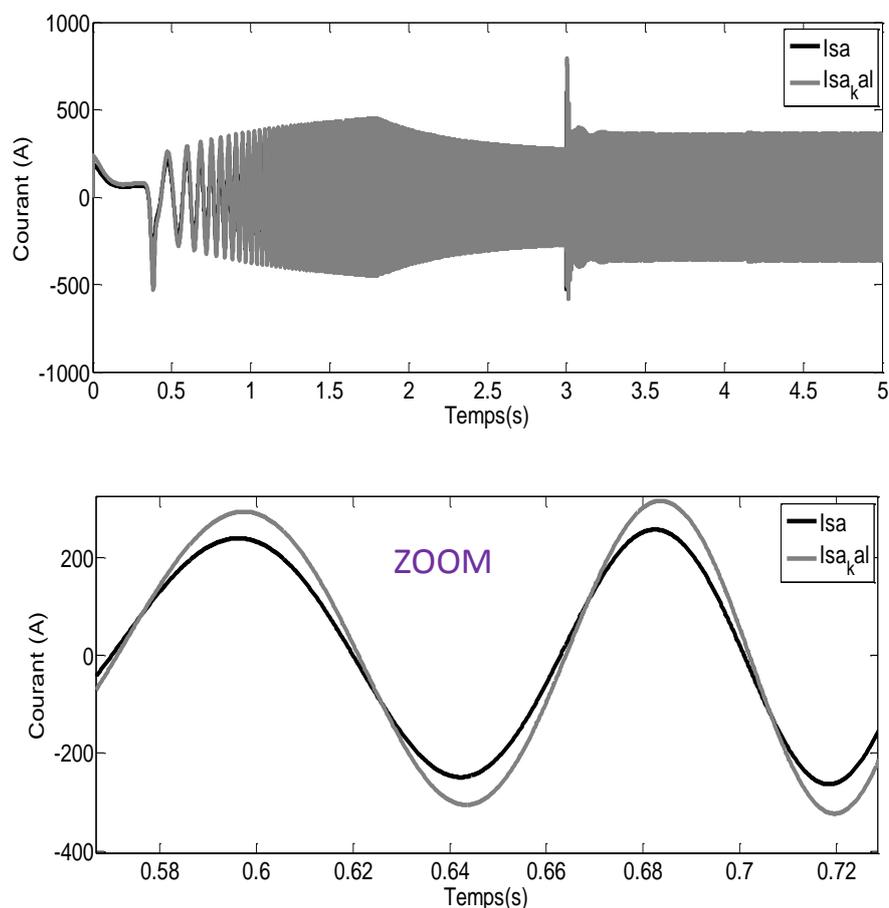


Figure IV.14 Courant de la machine de la phase ( $I_{sa}$ ), courant de l'observateur ( $I_{s_{kal}}$ )

La figure IV.15 illustre l'application de cet estimateur sur la sortie de la machine conduit à la convergence de la résistance jusqu'à 3 secondes (application du défaut). On constate alors que l'observateur n'arrive pas à faire converger la résistance estimée suite à l'application du défaut. Ceci s'explique car le modèle utilisé pour les équations de l'observateur est un modèle équilibré. Or le défaut se traduit par un comportement déséquilibré de la machine. L'observateur n'a d'autre choix que de faire évoluer dynamiquement la résistance rotorique afin que les autres états soient cohérents par rapport aux mesures.

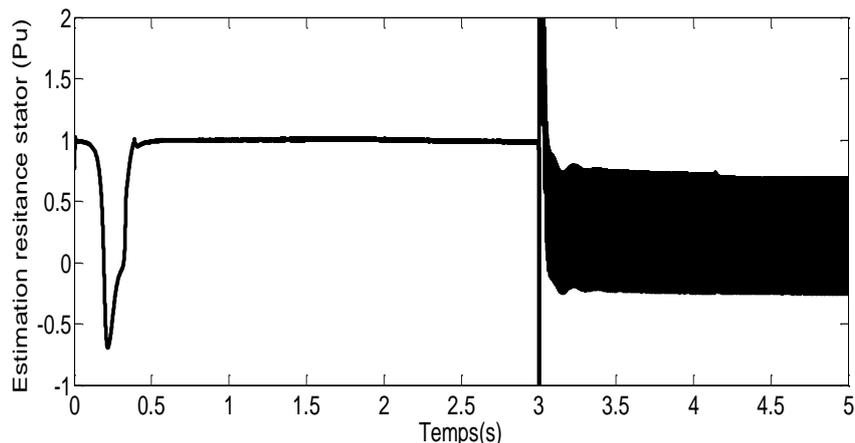


Figure IV.15 Résistance rotorique estimée lors d'un défaut au stator

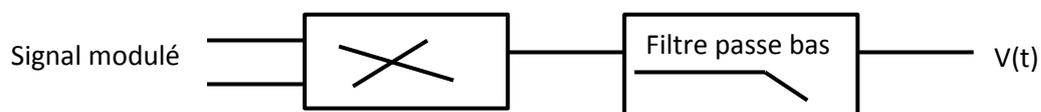
## 4.9 La démodulation synchrone appliquée à la résistance rotorique

On doit donc effectuer la transformation inverse de la modulation : « la démodulation ». Il existe plusieurs méthodes pour démoduler un signal modulé en amplitude. Nous allons en voir un : la démodulation synchrone :

- Traitement du signal en fréquence, circuit non-linéaire (multiplieur).
- Fonctionne quelque soit le taux de modulation.
- Est peu sensible aux bruits qui ont pu s'ajouter au signal modulé durant la transmission.
- Plus difficile à réaliser car nécessite de connaître la porteuse utilisée lors de la modulation.

### 4.9.1. Démodulation par détection synchrone

La méthode que nous étudions exige de disposer d'un signal de même fréquence et de même phase que la porteuse, c'est pourquoi cette méthode est appelée détection synchrone. Ci-dessous le schéma de principe.



On utilise un multiplieur analogique et on lui envoie en entrée, d'une part le signal modulé. La détection synchrone nécessite la présence d'un signal synchrone avec la porteuse qu'on peut produire à partir du signal AM par écrêtage et filtrage sélectif ou par une boucle à verrouillage de phase accrochée sur la porteuse modulée. Chaque défaut possède une fréquence qui le caractérise, l'idée de cette méthode consiste à rechercher l'amplitude de la raie associée à cette fréquence pour détecter l'évolution de celle-ci. Le principe de cette démodulation est exposé par la figure suivante.

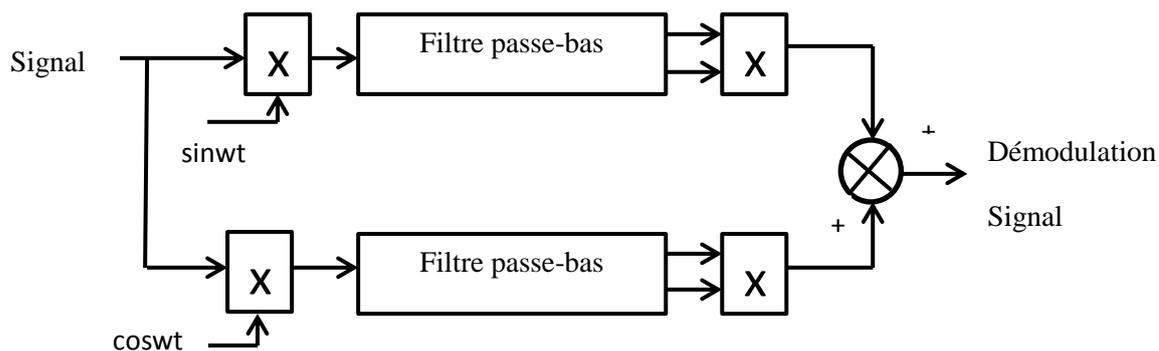


Figure IV.16 Principe de la démodulation

Notons aussi que cette méthode ne conserve que la composante continue de signal. La figure suivante présente l'amplitude de la raie associée à la fréquence de défaut ( $2f_e$ ). La caractéristique est bien détectée par ce système de surveillance. Le défaut est appliqué à 3 secondes.

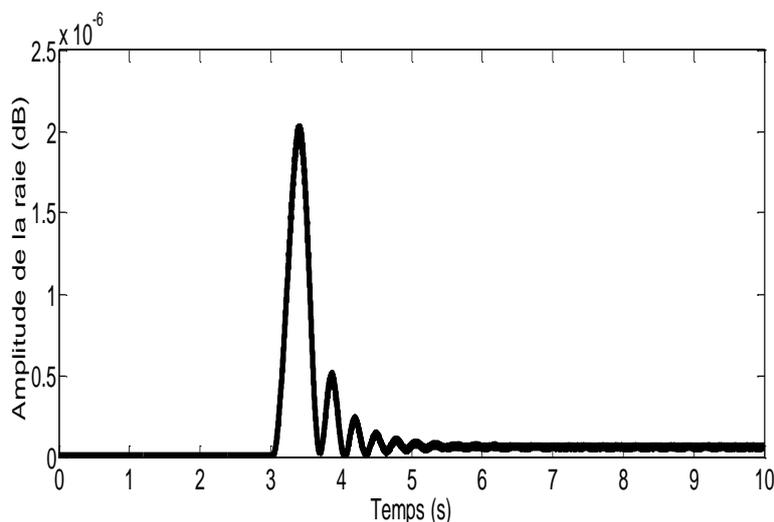


Figure IV.17 Résistance rotorique compensée démodulée

#### 4.10 Défaut d'onduleur

La figure IV.18 présente l'allure du courant statorique de la machine en défaut d'onduleur. Nous avons choisi de prendre en compte des effets d'un composant ouvert. Pour cela, nous avons inclus un bloc permettant de bloquer les ordres de commande arrivant à l'interrupteur considéré comme défaillant. Après la période de fluxage (0s-0.3s), on remarque que la grandeur est sinusoïdale jusqu'à l'application du défaut à l'instant  $t=3$  seconde. L'occurrence du défaut conduit donc à l'apparition des fréquences qui caractérisent ce défaut en basse et haute fréquence (voir la figure IV.19 qui présente la FFT du courant statorique).

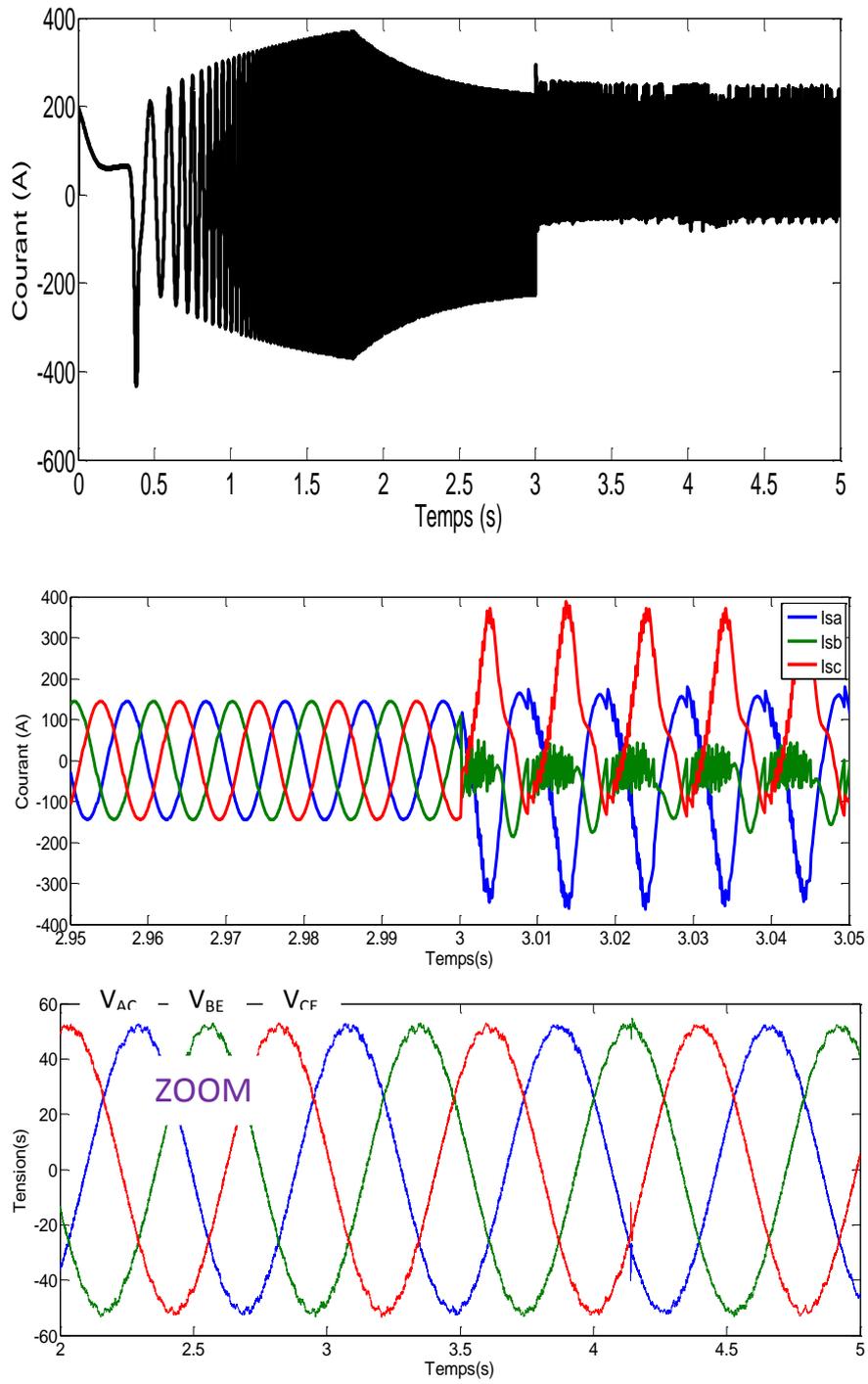


Figure IV.18 Courant statorique de la machine en défaut d'onduleur

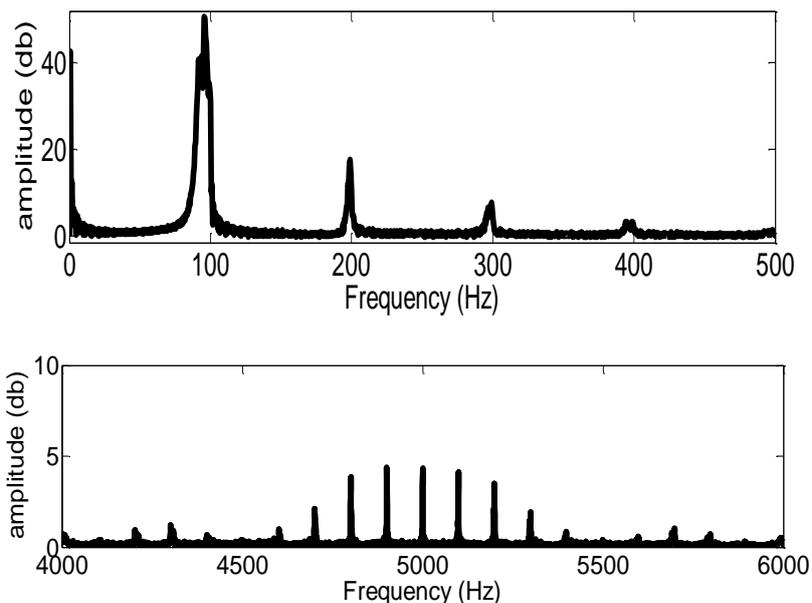


Figure IV.19 FFT du courant en basse et haute fréquence

La figure IV.20 illustre l'application de cet estimateur sur la sortie de la machine conduit à la convergence de la résistance jusqu'à 3 secondes (application du défaut). On constate alors que l'observateur n'arrive pas à faire converger la résistance estimée suite à l'application du défaut. Les fréquences qui existent alors sont comme pour les autres défauts liés à la manifestation du défaut. Il peut alors être utile de suivre l'existence de la fréquence liée à la MLI. Cette fréquence n'existe en fonctionnement normal est facile à détecter du fait de sa valeur fixe (contrairement aux fréquences caractéristiques des défauts stator et rotor qui sont liées à la fréquence statorique et à la vitesse).

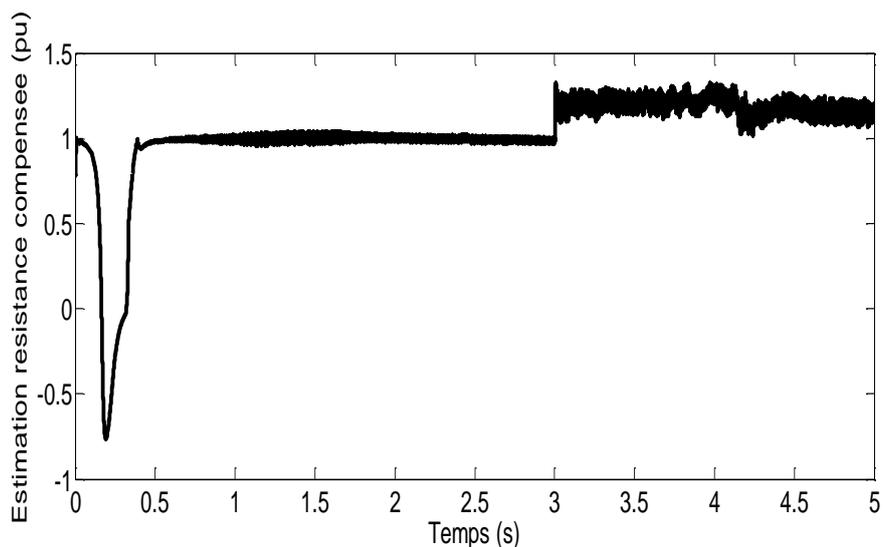


Figure IV.20 Résistance rotorique estimée de la machine pour un défaut d'onduleur

## 4.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode qui repose sur la connaissance d'un modèle de fonctionnement de l'application. Dans une première partie, nous avons envisagé d'utiliser des observateurs d'état pour la surveillance de la machine ainsi que leurs versions étendues à un des paramètres de la machine (en l'occurrence les résistances). Nous avons décrit une technique pour estimer et suivre les courants et la résistance rotorique de la machine asynchrone. Cette technique a été vérifiée par simulation. Les résultats obtenus montrent que le filtre de Kalman étendu peut estimer avec précision. La simulation avec le logiciel MATLAB a donné des résultats qui reflètent l'état de la machine. Notre filtre nous permet d'identifier la présence des défauts au niveau de la machine (électriques et mécaniques). Un travail de modélisation complémentaire est à mener pour progresser dans ce domaine.

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

---

Ce travail a porté sur le diagnostic et la détection de défauts de la machine asynchrone. Trois types de défauts ont été traités à savoir le défaut statorique, le défaut rotorique et le défaut de roulement. Nous avons dressé une liste non exhaustive de nombreuses défaillances à travers le descriptif de l'état de la machine tournante à des fins de diagnostic.

Nous avons ensuite présenté les différentes approches de la modélisation, les techniques et autres outils de diagnostic étant très nombreuses, nous les avons classées en deux approches: une approche signal basée sur le traitement de signal des grandeurs mesurables, à savoir le courant et la tension. Une approche système, en l'occurrence la classification par les représentations temps-fréquence.

Compte tenu de la difficulté de recréer expérimentalement des situations de défauts, il s'est vite avéré nécessaire de disposer d'un outil de simulation suffisamment représentatif des diverses situations (système sain et défaillant). Nous avons donc présenté dans la troisième partie, un modèle permettant la simulation d'une machine asynchrone. Nous avons décrit la méthodologie qui nous a permis d'aboutir à la formulation des différentes équations régissant le système.

Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté, la méthode de redondance analytique repose sur l'utilisation de modèles du dispositif incluant ou non l'influence des défauts et des perturbations sur l'état et la sortie. La sortie du modèle est comparée aux données accessibles pour former un résidu exploité pour alimenter un processus d'estimation d'état et/ou de paramètre (observateur, identification, observateur étendu) et éventuellement d'adaptation de paramètres (observateurs étendus). Les observateurs peuvent être exploités en tant que tels pour détecter et éventuellement localiser des défauts dans la mesure où ils se traduisent par une rupture de modèles et aboutissent à une variation du résidu.

Nous sommes conscients de n'avoir étudié que certains points d'un sujet d'étude très vaste qui nécessite la compréhension du système et l'utilisation d'outils appropriés. Les perspectives à ce travail sont multiples, du point de vue de la surveillance, l'utilisation d'autres paramètres (résistance statorique, l'inductance statorique) pour évaluer la performance de l'observateur étendu. Ensuite, du point de vue la détection des défauts, il s'agira d'étudier la surveillance de ce type de machine utilisée en tant que générateur de puissance (de type éolien par exemple) connecté au réseau électrique.

# Bibliographie

---

- [ABE-99] A.Abed, L.Aghli, H.Razik, A.Rezzoug  
`` Modeling induction motor for diagnostic purpose ``  
EPE Conference Meeting Proceedings, 1999
- [AKA-99] K.Akatsu, A. Kawamura, G. Guidi, H. Umida  
`` Sensorless very low and zero speed estimations with on-line secondary  
resistance estimation of induction motor without adding any signal ``  
IAS Annual Conference Meeting Proceedings, Phoenix, Arizona, Vol.1, pp.187-  
193, 1999
- [ALG-65] P. Alger  
`` The Nature of Induction Machine``  
Gordon and Breach Science Publishers, 1965
- [ALL-78] `` Handbook of loss prevention``  
Allianz-Versicherungs-AG, Berlin/Munschen, 1978
- [ALL-88] Allianz,  
`` Présentation des Avaries. Machines Electriques Tournantes ``  
Cahier des préventions, CP2, 1988
- [ARZ-99] J.Arza  
`` Commande Vectorielle sans capteur mécanique d`une machine roue asynchrone``  
Thèse de Doctorat de l`Institut National Polytechnique de Grenoble, 1999
- [ATK-91] D.J Atkinson, P.P Acarnley, J. W. Finch  
`` Observers for Induction Motor State and Parameter Estimation ``  
IEEE Trans. On industry Applications, Vol.27, No. 6, November/December 1991,  
pp. 1119-1129
- [ATK-96] D.J Atkinson, J. W. Finch  
`` Estimation of rotor resistance in induction motors ``  
IEE Proc-Electr; Power Appl, Vol. 143, No. 1, January 1996, pp.87-94, 1996
- [BAC-02] Smail Bachir, Jean Claude Trigeassau, Slim Tnani  
`` Diagnostic des défauts statoriques et rotoriques par identification paramétrique  
sans capteur de vitesse ``  
Conference Internationale Francophone d'Automatique, Nantes 8-10 juil-2002
- [BAS-88] M. Basseville  
``Detecting changes in signals and systems-A survey ``  
Automatica, Vol. 24, pp. 309-326, 1988
- [BEL-99] A.Bellini, F. Filippeti, G. Franceschini, C. Tasoni  
``Closed loop control impact on the diagnosis of induction motor fault ``  
IAS Annual Conference Meeting Proceeding, 3-7 octobre 1999, Phoenix,  
Arizona, Vol. 3, pp. 1913-1921, 1999

- [BEN-98a] M. E. H. Benbouzid,  
``A Review of Induction Motor Signature Analysis as a Medium for Faults  
Detection``  
IECON 98 Annual Conference Meeting Proceedings, pp 1950-1955, 1998
- [BEN-98b] M. E. H. Benbouzid, H. Nejjari, M. Vieira  
`` Induction Motor Faults Detection Using Advanced Spectral Analysis  
Technique``  
ICEM 98 Annual Conference Meetins Proceedings, pp. 1849-1998
- [BEN-99a] M. E. H. Benbouzid  
``Induction Motors Faults Detection and Localisation Using Stator Current  
Advanced Signal Processing Techniques``  
IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 14, No. 1, January, pp. 14-22, 1999
- [BEN-99b] M. E. H. Benbouzid, H. Nejjari, R; Beguenane, M. Vieira  
`` Induction Motor Asymmetrical Faults Detection Using Advanced Signal  
Processing Techniques``  
IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, June, pp.147-152, 1999
- [BEN-00] M. E. H. Benbouzid  
``A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection  
IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 5, pp. 984-993, 2000
- [BER-94] A.Bernieri, M. D`Apuzzo, M. Savastano  
`` A neural network approach for identification and fault diagnosis on dynamic  
Systems``  
IEEE Trans, on Instrumentation and Measurement, Vol. 43, No. 6, December  
1994, pp. 867-8873, 1994
- [BER-96] A.Bernieri, G. Betta, C. Liguori  
``On-line fault detection and diagnosis obtained by implementing neural  
Algorithms on a digital signal processor``  
IEEE Trans. On Instrumentation and measurement, Vol. 45, No. 5, October 1996,  
pp. 894-899, 1995
- [BLA-72] F. Blaschke  
`` The principale of field oriented as applied to the new transvector close-loop  
system for rotating machines``  
Siemens Review, Vol. 39, No. 4, pp. 217-220, 1972
- [BLO-08] M. Blödt, P. Granjon, B. Raison, G. Rostaing,  
``Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current  
Monitoring``  
IEEE Transactions on Industry Electronics, Vol. 55, N°4, PP. 1813-1822, 2008
- [BON-91] L.Bondant  
`` Methodologie d`analyse temps-frequence des signaux vibratoires de machines  
tournantes``  
Thèse de doctorat de l`institut National Polytechnique de Grenoble, 1991

- [BON-92] A. H. Bonnett, G.C. Soukup  
`` Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors ``  
IEEE Trans. On industry Applications, Vol. 28, No. 4, July/ August 1992, pp.921-937, 1992
- [BON-93] A. H. Bonnett  
`` Cause and Analysis of Anti-Friction Bearing Failures in AC Induction Motors``  
IEEE Conference Publications, Pulp and Paper Industry Technical Conference, PP. 36-46, 1993
- [BOS-97] S.G. Bosga, J.J.A. v.d. Burgt, A.J.A. Vandenput  
``Asymetrical operation of a voltage-inverter-fed induction machine ``  
EPE Conference Meeting Proceeding, Trondheim, 8-10 september 1997, Vol.2, pp.500-505
- [BOU-07] A.H Boudinar, A. Bendiabdellah., N. Bennouza, N. Boughanemi  
`` Three Phase Induction Motor Incipient Rotor's Faults Detection Based on Improved Root-MUSIC Approach``  
International Review of Electrical Engineering, vol. 2 n. 3, pp. 406-413,2007
- [BOU-13] M. Bouzid, G. Champenois  
`` An Efficient, Simplified Multiple-Coupled Circuit Model of the Induction Motor Aimed to Simulate Different Types of Stator Faults``  
Elsevier, Journal of Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 90, PP 98-115, 2013
- [BUS-96] D.Busse, J.Erdman, R.J Kerkman, D.Schlegel, G. Skibinski  
`` System electrical parameters and their effects on bearing current ``  
IAS Annual Conference Meeting Proceedings, pp 570-578, 1996
- [CAM86] J.R. Cameron and al  
`` Vibration and Current Monitoring for Detecting Air gap Eccentricity in Large Induction motors ``  
IEE Proceedings, Vol.133, Pt. B No.3 May 1986
- [CAP-92] C. Capdessus  
`` Aide au diagnostic des machines tournantes par le traitement du signal``  
Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1992
- [CAR-95] J.P. Caron, J.P. Hautier  
`` Modélisation et commande de la machine asynchrone ``  
Technip, 1995
- [CAP-92] Capdessus B  
`` Aide au diagnostic des machines tournantes par traitement du signal``  
Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 1992

- [CAS-03] Casimir R  
`` Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes``  
Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2003
- [CEB-12] A. Ceban,  
`` Méthode Globale de Diagnostic des Machines Electriques``  
Thèse de Doctorat, Université d'Artois, Laboratoire Systèmes Électrotechniques  
et Environnement, France, 2012
- [CHA-14] A.Chahmi, M.Bendjebbar, B.Raison,  
`` Fault Detection In Electrical Drives - Approach Signal ``  
Electrical Sciences and Technologies in Maghreb  
CISTEM 2014 International Conférence On, Novembre 3-6, 2014, Tunisie
- [CHO-92] K.R. Cho, H.Lang, S.D. Umans  
``Detection of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using State and  
Parameters Estimation ``  
IEEE Trans, on Industry Applications, Vol. 28, No. 3, May / June 1992, pp. 702-  
709, 1992
- [CHO-95] T.W.S. Chow, Gou Fei,  
`` Three phase induction machines asymmetrical faults identification using  
bispectrum ``  
IEEE Transaction on Energy Conversion, Volume 10, Issue 4, Décembre 1995, pp.  
688 – 693
- [CIR-94] G. Cirrincione, M.Cirrincione, G. Vitale  
`` A Kohonen neural network for the diagnosis of incipient in induction motors ``  
ICEM 94 Proceeding, Paris, Vol. 2, pp.369-373, 1994
- [COM-00] C.Combastel  
`` Méthodes d'aide à la décision pour la détection et la localisation de défauts  
dans les entraînements électrique ``  
Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2000
- [COR-77] Cornell E.P., Lipo T. A.,  
`` Modeling and design of controlled current induction motor drive systems``  
IEEE Transactions on Industry applications, Vol. Ia-1 3 (4), pp 321-330, 1977
- [COU-97] S.Courtine  
`` Détection et localisation de défauts dans les entraînements électriques ``  
Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1997
- [CRU-99] S. M. A. Cruz, A. J. M. Cardoso,  
`` Rotor Cage Fault Diagnosis In Three Phase Induction Machines By The Total  
Instantaneous Power Spectral Analysis``  
IEEE IAS'99, pp.1929-1934, Phoenix, 1999

- [CUS-08] J. Cusido, L. Romeral, J. A. Ortega, J. A. Rosero, A. Garcia,  
`` Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition``  
IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 2, pp. 633–643, 2008
- [DEL82] W. Deleroi  
`` Squirrel cage motor with broken bar in the rotor - Physical phenomena and their experimental assessment``  
Proceedings part 3, Budapest, 1982
- [DEL-99] K. Delare, M. Iadevaia, W. Heylen, P. Sas, K. Hameyer, R. Belmans  
`` Statistical energy analysis of acoustic noise and vibration for electric motors: Transmission from air gap field to motor frame ``  
IAS Annual Conference Meeting Proceedings, 3-7 October 1999, Phoenix, Arizona, Vol. 3, pp. 1897-1902
- [DER-00] Derrhi M.  
`` Modélisation de la machine asynchrone par réseaux de perméances : Validation par le diagnostic``  
Thèse de Doctorat, Université de Picardie Jules Verne, France, 2000
- [DES-99] X.Desforgues  
`` Méthodologie de surveillance en fabrication mécanique: application de capteur intelligent a la surveillance d`axe de machine- outil ``  
Thèse de Doctorat de l`Université Bordeaux I, 1999
- [DEV 01] Devanneaux V., Kabbaj H., Dagues B. et Faucher J.,  
`` An accurate model of squirrel cage induction machines under static, dynamic or mixed eccentricity ``  
Proc. IEEE SDEMPED 2001 – Symposium on Diagnostics for Electric Machines Power Electronics and Drives, pp.121-126, Italy 1-3 September 2001
- [DIA-05] Diallo D., Benbouzid M. E. H., Hamad D., Pierre X.,  
`` Fault detection and diagnosis in induction machine drive: A pattern recognition approach based on Concordia stator mean current vector ``  
IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, (3), pp. 512-519. 2005
- [DID 04] Didier G.  
``Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances``  
Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2004
- [DOR-97] D. G. Dorrell, W. T. Thomson, S. Roach,  
"Analysis of Airgap Flux, Current, and Vibration Signals as a Function of the Combination of Static and Dynamic Airgap Eccentricity in 3-Phase Induction Motors"  
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, N°1, PP. 24-34, 1997

- [DRI-99] M. Drif, N. Benouzza, J.A. Dente  
``Rotor cage faults detection in 3-phases induction motors using instantaneous Power spectrum``  
Electrimacs 99 Proceedings, Vol. 3, pp. 287-292, 1999
- [DU-94] B.Du  
``Méthodologie d'identification des paramètres de la machine à induction- Application à la détermination indirecte de la température rotorique``  
Thèse de doctorat de l'Université Montpellier II, 1994
- [DUB-90] Dubuisson B  
``Diagnostic et reconnaissance des formes. Traité des nouvelles technologies``  
Série Diagnostic et Maintenance, Hermès, Paris, France, 1990
- [DUG-80] L.Dugard, I. D.Landau  
``Recursive output error Identification Algorithms: Theory and Evaluation``  
Automatica, Vol. 16, pp. 443-462, 1980
- [ELB-97] M. El Badaoui, F. Guillet, N. Nejjar, P. Martini, J.Daniere  
``Diagnostic d'un train d'engrenages par analyse spectrale synchrone``  
PRC Diagnostic, ENSAM, Paris, 02 octobre 1997
- [ELK-92] N.M. Elkasabgy, A. R. Eastham, G. E. Dawson  
``Detection of Broken Bars in the Cage Rotor of an Induction Machine``  
IEEE Trans, on Industry Applications, Vol.32, No. 2, January/ February 1992, pp. 165-171, 1992
- [EPR-82] EPRI  
``Improved Motors for Utility Applications``  
Final report Publication EL-2678, Vol. 1, EPRI, 1763-1, 1982
- [ERD-96] J.M. Erdman, R.J. Kerkman, D.W. Schlegel, G.L. Skibinski  
``Effect of PWM inverters on AC motor bearing currents and shaft voltages``  
IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 32, No. 2, March/ april 1996, pp. 250-259, 1996
- [ESF-14] E. T. Esfahani, S. Wang, V. Sundararajan  
``Multisensor Wireless System for Eccentricity and Bearing Fault Detection in induction Motors``  
IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 19, N°3, PP. 818-826, 2014
- [FAI-09] J. Faiz, B. M. Ebrahimi, H. A. Toliyat  
``Effect of Magnetic Saturation on Static and Mixed Eccentricity Fault Diagnosis in Induction Motor``  
IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, N°8, PP. 3137- 3144, 2009

- [FER-13] M. Ferradj, N. Benouzza, A. Bendiabdellah, B. Mazari  
``Synthesis of Electrical Quantities Applied to Squirrel Cage Induction Motor Bearing Faults Detection``  
International Review of Electrical Engineering vol. 8 n. 5, pp. 1446 – 1460, 1993
- [FIL-95] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni  
`` Neural networks aided on-line diagnostics of induction motor rotor faults ``  
IEEE Trans. On Industry applications, Vol. 31, No.4, July, pp. 892-899, 1995
- [FIL-98] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, P. Vas  
`` AI Techniques in Induction Machines Diagnosis Including the Speed Ripple Effect``  
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, N°1, PP. 98-108, 1998
- [FIL- 00] Filippetti F., Franceschini G. and Tassoni C  
`` Recent developments of induction motor drives fault diagnosis using AI Techniques ``  
IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 47(5), pp. 994-1004, 2000
- [FIS-96] R. Fiser, S. Ferkolj  
`` Modelling of dynamic performance of induction machine with rotor faults ``  
ICEM Proceedings, No. 1, 10-12 September 1992, pp. 17-22, 1996
- [FIX-51] Fix E, Hodges J L  
`` Discriminatory analysis. Non-parametric discrimination``  
USAF School of Aviation Medicine, Randolph Field, TX, 4 Technical Reports 4, 1951
- [FRA-87] P.M. Frank  
``Fault diagnosis in dynamic systems via state estimation – A survey ``  
Vol.1, pp. 35- Redidel Press, 1987
- [FRA-00] P.M. Frank, S.X. Ding, B. Koppen-Seliger  
``Current developments in the theory of FDI``  
SafeProcess 2000 Preprints, Budapest, 14-16 June 2000, Vol.1, pp. 16-27, 2000
- [FRA-90] P.M. Frank  
`` Fault diagnosis in dynamic systems using analytic and knowledge based Redundancy- A survey and some results ``  
Automatica, Vol. 26, pp. 459-474, 1990
- [FRA-91] G. Franceschini, C. Tassoni, F. Filippetti, M. Martelli, G. Gentile, N. Rotondale  
``Diagnostic indexes for knowledge based representation of induction machine Stator short-circuits ``  
EPE Conference Meeting Proceeding, Firenze, Vol. 4, pp. 312-317, 1991

- [FRA-93] P.M. Frank  
`` Advanced in observer-based fault diagnosis ``  
International Conference on Fault Diagnostic, Toulouse, 5-7 April, 1993
- [FU-74] Fu K. S, ``Syntactic methods in pattern recognition``  
Academic Press, Inc, New York, USA, 1974
- [GAB-46] D. Gabor,  
`` Theory of communication``  
J. IEE (London), Vol. 93, No. 3, pp. 429–457, 1946
- [GEN-07] Gentil S., Celse B., Charbonnier S., Cocquempot V., Hamelin F., Lesecq S.,  
Maquin D., Montmain J., Ragot J. and Sauter D  
`` Supervision des procédés complexes``  
Lavoisier, France, 2007
- [GHA-09] V.N. Ghatel, S.V. Dudu  
`` Artificial Neural Network Based Fault Classifier For Three Phase Induction  
Motor ``  
International Journal of Computational Intelligence Research, ISSN 0973-1873  
Volume 5, Number 1, pp. 25–36, 2009
- [GRI-99] H. T. Grimmelius, P.P. Meiler, H. L. Maas, B. Bonnier, J. S. Grevink, R.F. Van  
Kuilenburg  
`` Three State-of the- Art Methods for Condition Monitoring ``  
IEEE Trans. On industrial Electronics, Vol. 46, No. 2, April 1999, pp.407-416  
1999
- [GUI-99] G. Guidi, H. Umida  
`` A sensorless induction motor drive for low speed applications using a novel  
stator resistance estimation ``  
IAS Annual Conference Meeting Proceedings, Phoenix, Arizona, Vol.1, pp. 180-  
186, 1999
- [GUS-92] Gustafson D., Kessel W.,  
``Fuzzy clustering with a fuzzy covariance matrix``  
IEEE Fuzzy Models for Pattern Recognition, 1992 reprinted from Proc. IEEE
- [HAN-03] Y. Han, Y. H. Song,  
`` Condition Monitoring Techniques for Electrical Equipment-A Literature  
Survey``  
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 18, No. 1, pp. 4-13, 2003
- [HAN-06] T. Han, B.S. Yang, W. Choi, and J. Kim,  
`` Fault Diagnosis System of Induction Motors Based on Neural Network and  
Genetic Algorithm Using Stator Current Signals``  
International Journal of Rotating Machinery, Article ID 61690

- [HEM-02] L. Heming, X. Zhaofeng,  
`` A new method of turbine-generator vibration fault diagnosis based on correlation dimension and ANN Wan Shuting ``  
International Conference on Power System Technology, 2002 Proceedings  
Volume 3, 13-17 Oct. 2002 Page(s):1655 – 1659
- [HEM-06] Hemsas K.E.  
`` Développement d'un nouveau modèle de la machine asynchrone pour la commande et la surveillance``  
Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif, Alegria, 2006
- [HEN-53] G. Henriot  
`` Traite théorique et pratique des engrenages ``  
Dunot Editeurs, Paris, 1953
- [IBR-09] A. Ibrahim,  
`` Contribution au Diagnostic de Machines Electromécaniques: Exploitation des Signaux Electriques et de la Vitesse Instantanée``  
Thèse de Doctorat, Université de Saint Etienne, France, 2009
- [IEE-85] IEEE Motor reliability working group  
`` Report on large motor reliability survey of industrial and commercial Installations ``  
IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. IA-21, No. 4, July-August 1985, pp 853-872, 1985
- [ISE-97] R. Isermann, P. Balle  
`` Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of Technical processes ``  
Control Engineering Practice, Vol. 5, pp. 709-719,1997
- [JAC-95] B. Jacquot  
`` Conception, étude et réalisation des algorithmes de commande des systèmes de Traction asynchrone pour les TGV de nouvelle génération ``
- [JER-00] N. Jerance, B. Raison, O. Sename  
``Observer based fault detection and isolation in induction machine drive ``  
Safeprocess 2000 Preprints, Budapest, 14-16 June, Vol. 1, pp. 955-960, 2000
- [JIA-96] Y. Jiang, A. Ekstrom  
`` General formulation for analysis of harmonic transfer through converters ``  
UPEC 96, Eraklio, Grece, pp. 680-683, 1996
- [KAI-14] M. Y. Kaikaa, M. Hadjami,  
``Effects of the Simultaneous Presence of Static Eccentricity and Broken Rotor Bars on the Stator Current of Induction Machine``  
IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, N°5, PP. 2452-2463, 2014

- [KER-84] L. Kerszenbaum et C. F. Landy,  
`` The existence of large inter bar currents in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and en-ring faults``  
IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. PAS-103, n°7, pp.1854-1862, July 1984
- [KEY-98] B.Keyes  
`` Le contrôle de process prépare sa métamorphose ``  
Mesures, No. 703. Mars 1998, pp. 66-71, 1998
- [KHA-08] A.Khatir  
`` Etude comparative des modèles des MAS utilisé en diagnostic des pannes``  
Mémoire de magister, université Ferhat Abbas-Sétif ,20008
- [KIL-00] B. G. Kliman, J. W. Premerlani, A. R. Koegl, D. Hoeweler  
`` Sensitive, on-line turn-to-turn fault detection in AC motors Electric Machines and Power Systems``  
Vol. 28, pp. 915-27, 2000
- [KLI- 92] G. B. Kliman, J. Stein  
``Methods of Motor Current Signature Analysis ``  
Electric Machines and Power Systems, Vol. 20 No. 6, pp. 463-474, 1992
- [KLI-96] B. G. Kliman, J. W. Premerlani, A. R. Koegl, D. Hoeweler  
`` A new approach to on-line turn fault detection in AC motors``  
Conference Record of the IEEE Industry Applications Society, Vol. 1, pp, 687-693, San Diego, 1996
- [KLI-98] G.B. Kliman, W.J. Permerlani, B. Yazid, R.A Koegel  
`` Recent developments in on-line motor diagnostics ``  
ICEM Proceedings, pp. 471-475, 1998
- [KOH-02] J L Kohler, J Sottile, F C Trutt,  
`` Condition monitoring of stator windings in induction motors: Part I - Experimental investigation of the effective negative sequence impedance detector  
IEEE Transactions on Induslry Applicalions, Vol. 38, No. 5, pp. 1447-1453, 2002
- [KUB-93] H. Kubota, K.Matsuse, T.Nakano  
`` DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor ``  
IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 29, No. 2, pp.344-348,1993
- [KWO-99] Y.A. Kwon, D.W. Jin  
`` A noval MRAS based speed sensorless control of induction motor ``  
IECON Annual Conference Meeting Proceedings, San Jose, Californie, pp. 1999
- [LAN-79] I. D. Landau  
`` Adaptive Control- The Model Reference Approach ``  
Marcel Dekker , New York , 1979

- [LAN-93] I.D. Landu  
`` Identification et commande des systemes ``  
Hermès, Paris, 1993
- [LEB-06] Lebaroud A.  
`` Modélisation et techniques orientées vers le diagnostic de la machine asynchrone associée à des sources variables``  
Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Alegria, 2006
- [LEB-08] A. Lebaroud and G. Clerc  
`` Classification of induction machine faults by optimal time-frequency representations ``  
IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 55 n. 12, pp. 4290–4298, September 2008
- [LEB-09] A. Lebaroud, G. Clerc,  
`` Accurate diagnosis of induction machine faults using optimal time-frequency representations’, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 22, Issue 4-5, pp 825-832, June 2009
- [LEE-04] S. Lee, S. Kim, J.M. Kim, M.H Lee  
`` Fourier and wavelet transformations for the fault detection of induction motor with stator current ``  
30th Annual Conference IECON, 2-6 Nov. 2004
- [LEG-96] S. Legowski, A.H. Sadrul Ula, A.M. Trzynadlowski  
`` Instantaneous power as a medium for the signature analysis of induction Motors ``  
IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 32, No. 4, August 1996, pp.904-909, 1996
- [LEO-85] W. Leonhard  
`` Control of electrical drives ``  
Springer Verlag, 1985
- [LES-07] S. Lesecq S, S. Gentil, I. Fagarasan  
`` Fault isolation based on wavelets transform``  
16th International Conference on Control Systems and Computer Science, Roumania
- [LJU-87] L. Ljung  
`` System identification- Theory for the User ``  
Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1987
- [LIP 71] Lipo T. A.,  
`` The analysis of induction motors with voltage control by symmetrically triggered thyristors``  
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.90, (2), 1971

- [LIP 75] Lipo T. A., Cornell E. P.,  
`` State-variable steady-state analysis of a controlled current induction motor drive``  
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.11, (6), 1975
- [LIP 84] Lipo T. A., Consoli A.,  
`` Modeling and simulation of induction motors with saturable leakage reactances``  
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.20 (1), pp. 180-189, 1984
- [LOR-98] L.Loran  
`` Identification et commande des machines électriques ``  
Habilitation à diriger des recherches, Université de Technologie de Compiègne,  
Janvier 1998
- [MAI-92] R.Maier  
`` Protection of Squirrel-Cage Motor Utilizing Instantaneous Power and phase  
Informations``  
IEEE Transactions On Industry Applications, Vol.28, No. 2, pp 376-380, 1992
- [MAL-89] S. G. Malat,  
``A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation``  
IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.2, No.7,1989
- [MAL-98] S.G. Mallat,  
``A wavelet tour of signal processing``  
Second ed, Academic Press, 1998
- [MAN-96] S.T. Manolas, J. Tegopoulos, M. Papadopoulos  
``Analysis of squirrel cage induction motors with broken rotor bars ``  
ICEM 96 Proceedings, Vol. 3, pp. 19-23, 1996
- [MAR-93] A. Martinez  
`` Élément de diagnostic et d`optimisation du fonctionnement d`un entraînement  
Electrique dans son environnement applicatif ``  
Thèse de doctorat de l`Institut National Polytechnique de Grenoble, 1993
- [MAR-99] A. J. Marques Cardoso, S.M.A. Cruz, D.S.B. Fonseca  
`` Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors, by  
Park's vector approach``  
Energy Conversion, IEEE Transaction on, Volume 14, Issue 3, Sept. 1999, pp.  
595 – 598
- [MCD-99] D.Mc Donald, W. Gray  
`` PWM Drive Related Bearing Failures ``  
IEEE Industry applications Magazine, July / August 1999, pp. 41-47, 1999
- [TAB-02] M.E. Tabbache  
``Détection des défauts mécaniques par l`analyse des Signaux d`alimentation des  
moteurs asynchrones``  
Thèse de doctorat, Nancy, Juillet 2002

- [MON-90] J.M. Montalvao e Silva  
``Machinery vibration measurements and analysis``  
Vibration and Wear in high speed rotating machinery, Kluwer Academic Publishers, pp. 221-239, 1990
- [NAI-98] M.S. Nait Said, M. E. H. Benbouzid, A. Benchaib  
``Extended Kalman Filter- Based Rotor Resistance Identification for Sensorless Induction Motors Broken Bars Monitoring``  
ICEM 98 Proceedings, Vol, pp. 1012-1016, 1998
- [NAN-99a] S.Nandi, H. A. Toliyat  
``Fault Diagnostic of Electrical Machines- A Review``  
IEMDC 99 Proceedings, pp 219-221, 1999
- [NAN-99b] S.Nandi, H. A. Toliyat  
``Condition monitoring and fault Diagnosis of Electrical Machines- A Review``  
IAS Annual Conference Meeting Proceedings, 3-7 octobre 1999, Phoenix, Arizona, Vol. 1, pp. 197-204, 1998
- [NAI -00] Naït-Saïd M. S., Benbouzid M. E. H. and Benchaïd A.,  
``Detection of broken bars induction motors using an extended Kalman filter for rotor resistance sensorless estimation``  
IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.15, (1), pp. 66-70, Mar 2000
- [NEJ-98] H.Nejjari, M. E.H. Benbouzid  
``Monitoring and diagnosis of induction motors electrical faults using a current Park's vector pattern learning approach``  
IEMDC'99 Proceeding, pp. 275-277, 1999
- [NEJ-00] Nejari H. and Benbouzid M. E. H.  
``Monitoring and diagnosis of induction motors electrical faults using a current Park's vector pattern learning approach``  
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, (3), p.730-735. 2000
- [O'DO-85] P. O'Donnell  
``Report of Large Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations``  
IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-21, Part 1, N°4, PP. 853-864, 1985
- [OEH-97] H.Oehlmann, D. Brie, M. Tomczak, A. Richard  
``Time Frequency analysis of gearbox faults``  
IFAC SAFEPROCESS'97, August 26-28, pp. 669-674, 1997
- [OND-98] A. Onduk, C. Oz, Y. Uyaroglu, N. Yumusak  
``The fault detection of asynchronous motors using artificial neural network``  
ICEM' 98 Proceedings, pp. 460-464, 1994

- [OND-06] Ondel O.  
`` Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone``  
Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006
- [ORD-08] A. Ordaz-Moreno, R. J. Romero-Troncoso, J. A. Vite-Frias, J. R. Rivera-Gillen,  
``Automatic online diagnosis algorithm for broken-bar detection on induction motors based on discrete wavelet transform for FPGA implementation``  
IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 2, pp.2193-2202, 2008
- [PEI-89] S. C. Pei, S. B. Jaw  
``Computation of discrete Hilbert transform through fast Hartley transform``  
IEEE Transaction on Circuits Systems, Vol. 36, No. 9, pp. 1251–1252, Sep. 1989
- [PEN-86] J. Penman, M.N. Dey, A.J. Tait, W. E. Bryan  
`` Condition monitoring of electrical drives ``  
IEE Proc., Vol. 133, Pt. B, No. 3, May 1986, pp. 142-148, 1986
- [PEN-94] J. Penman, G. H. Sedding, A. B. Lloyd, W. T. Fink,  
`` Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors``  
IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, No. 4, Décembre, pp. 652-658, 1994
- [PEN-96] J. Penman, A. Stavrou  
``Broken rotor bars: their effect on the transient performance of induction Machines ``  
IEE Proc-Electr; Power Appl., Vol. 143, No. 6, November 1996, pp. 449-457
- [PEU-97] R. Peugeot  
`` Diagnostic de défaillance d`un entraînement ``  
Thèse de Doctorat de l`Institut National Polytechnique de Grenoble, 1997
- [POL] R. Polikar  
`` The wavelet tutorial `` Available: <http://users.rowan.edu/>
- [PRO-99] Prosyst  
``Les automates traquent les baisses de rendement ``  
Mesures, No. 719, Novembre 1999, pp. 109-113, 1999
- [QIU-99] Y. Qiu, L. Huang, B. Bai, Z. Xue  
`` A simple on-line estimation method of rotor resistance for induction motor Using MRAC ``  
IECON Annual Conference Meeting Proceedings, Sans Jose, Californie, pp, 1999
- [RAI-00] B. Raison, G. Rostaing, J.P. Rognon  
`` Towards a global monitoring scheme for induction machine drives ``  
IPEC 2000 Proceedings, Vol. 3, pp. 1182-1188, Tokyo, 3-7 avril 2000

- [RAI-99] B.Raison, G. Rostaing, J.P. Rognon  
`` Signal processing tools for monitoring induction drive ``  
IECON Annual Conference Meeting Proceedings, Sans Jose, Californie, Vol. 3,  
pp. 1198-1203, 1999
- [RET-97] N. Retiere  
`` Etude des défauts dans les associations onduleur-machine asynchrone. Exemple  
D`une chaine de traction ``  
Thèse de doctorat d l`Institut National Polytechnique de Grenoble, 1997
- [RIT-04] Ritchie E., Deng X. and Jokinen T.,  
`` Dynamic model of 3-phase squirrel cage induction motors with rotor faults ``  
ICEM '94, B6(2), pp. 694-698, France, 2004
- [ROM-05] R. Romarya, R. Corton, D. Thailly, and J.F. Brudny,  
`` Induction machine fault diagnosis using an external radial flux sensor ``  
Eur. Phys. J. Appl. Phys. 32, 125–132, 2005
- [ROS-97] G. Rostaing  
`` Diagnostic de défaut dans les entrainements électriques ``  
Thèse de Doctorat de l`Institut National Polytechnique de Grenoble, 1997
- [RUB-97] R. Rubini, M. Sidahmed  
`` Diagnosis of gear systems using the spectral correlation density of the  
vibration signal ``  
IFAC SAFEPROCESS`97, August 26-28, pp. 977-982, 1997
- [SAH-10] M. Sahraoui,  
`` Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones``  
Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2010
- [SCH-94] R.R. Schoen, T.G. Habetler  
`` A new method of current- based condition monitoring in induction machines  
Operating under arbitrary load conditions ``  
ICEM 94 Proceedings, pp. 282-287, 1994
- [SCH-95] R.R. Schoen, T.G. Habetler, F. Kamran, R.G. Bartheld  
`` Motor bearing damage detection using stator current monitoring ``  
IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 31, No. 6, November 1995  
pp. 1274-1279, 1995
- [SCH-97] R.R. Schoen, T.G. Habetler  
`` Evaluation and implementation of a system to eliminate arbitrary load effects in  
current- based monitoring of induction machine ``  
IEEE Trans. On Industry Applications, Vol.33, No.6, December 1997, pp 1571-  
1577

- [SCH-99] E. Schaeffer,  
`` Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts ``  
Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999
- [SER-01] M. Sérgio, A. Cruz, A. J. Marques Cardoso  
`` Stator Winding Fault Diagnosis in Three-Phase Synchronous and Asynchronous Motors, by the Extended Park's ``  
Vector Approach', IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, No.5, Sept-Oct. 2001
- [STA-01] A. Stavrou, G. H. Sedding, J. Penman  
`` Current monitoring for detecting inter-turn short circuits in induction motors``  
IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.16, No. I, March, pp. 32-37, 2001
- [THO-95] O. V. Thorsen, M. Dalva,  
`` A Survey of Fault on Induction Motors in Offshore Oil Industry, Petrochemical Industry, Gas Terminals, and Oil Refineries``  
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, N°5, PP. 1186-1196, September 1995
- [THO-99] O. V. Thorsen, M. Dalva.  
`` Failure Identification and Analysis for High Voltage Induction Motors in the Petrochemical Industry ``  
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, N°4, PP. 810-818, August 1999
- [THO-01] T. W. Thomson,  
`` On-line MCSA to diagnose shorted turns in low voltage stator windings of 3-phase induction motors prior to failure``  
IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Boston, 2001, pp. 891-898
- [TOL- 91] Toliyat H. A., Lipo T. A. and White J. C.,  
`` Analysis of a concentrated winding induction machine for adjustable speed drive application. Part 1: Motor analysis``  
IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6(4), pp 679-683, 1991
- [TOL-94] Toliyat H. A., Lipo T. A.,  
`` Analysis of a concentrated winding induction machine for adjustable speed drive applications. Part 2: Experimental results ``  
IEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 9(4), pp. 695-700, December 1994
- [TOL-95] H. A. Toliyat, T. A. Lipo,  
`` Transient Analysis of Cage Induction Machines under Stator, Rotor Bar and Ring Faults``  
IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, N°2, PP. 241-247, 1995

- [VAS-09] B. Vaseghi  
`` Contribution à l'Etude des Machines Electriques en Présence de Défaut Entre-Spires Modélisation-Réduction du Courant de Défaut``  
Thèse de Doctorat, Université de Nancy, France, 2009
- [VER-88] G.C. Verghese, S.R. Sanders  
`` Observers for flux estimation in induction machines``  
IEEE Trans. On industrial electronics, Vol.35, No. 1, February 1988, pp.85-94
- [VIS-87] N.Viswanadham, J.H. Talyor, E.C. Luce  
`` A frequency domain approach to failure detection and isolation with application to GE-21 turbine engine control systems ``  
Control- Theory and Advanced Technology, vol. 3, No. 1, pp. 45-72, 1987
- [WAL-06] O.Wallmark  
`` Control of Permanent-Magnet Synchronous Machines in Automative ``  
Thèse Doctorat, Goteborg, Sweden 2006
- [WER-12] U. Werner  
`` FE-Analysis of a Soft-Mounted Two-Pole Induction Motor Regarding Relative Shaft Vibration Caused by Static Rotor Eccentricity ``  
IEEE Conference Publications, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Sorrento, Italy, PP. 1448-1445, 2012
- [WOL-07] T. M. Wolbank, P. Macheiner,  
`` Comparison of Different Methods to Detect Static Air Gap Asymmetry in Inverter Fed Induction Machines``  
IEEE Conference Publications, 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems PEDS'07, 27-30 Nov. 2007 Bangkok, Thailand, PP. 675-680, 2007
- [WIE-97] R.Wieser, C. Kral, F. Pirker, M. Schagginger  
`` Condition monitoring of inverter fed induction machines by means of state variable observation``  
EMD97 Proceedings, 1-3 September 1997, pp.336-340, 1997
- [WIL-09] S. Williamson, S. Djurovic  
`` Origins of stator current spectra in DFIGs with winding faults and excitation asymmetries``  
IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Miami, 2009, Page(s):563 – 570
- [XU-04] Xu Bo-qiang, LI He-mhg, SUN Li-hg  
`` Detection of Stator Winding Inter-turn Short Circuit Fault in Induction Motors``  
International Conference on Power System Technology, Singapore, 21-24 November 2004

---

Annexe

---

### **Paramètres de la simulation**

- Temps machine = 20 s ;
- $T_0 = 0,0$  s ;
- Temps final = 5,0 s ;
- Temps echantionnage = 0,0001s ;
- Vitesse de reference = 200 Rad/s;

### **Paramètre de la machine**

- Résistance statorique  $R_s = 0,0142 \Omega$ ;
- Inductance statorique  $L_s = 0,001314$  H;
- Résistance rotorique  $R_r = 0,0126 \Omega$ ;
- Inductance rotorique  $L_r = 0,001286$  H ;
- Inductance mutuelle  $L_m = 0,00123$  H;
- Paire de pôle  $p = 3$ ;

### **Etat initiaux pour le système d'état de la machine**

$I_{a0} = 0$  A;    courant stator

$I_{b0} = 0$  A;

$F_{ra0} = 0$  w;    flux au rotor

$F_{rb0} = 0$  w;

### **Paramètres de l'accouplement souple**

Coté machine ;  $J_1 = 0,5$  ,  $f_1 = 0,01$

Coté charge ;  $J_2 = 0,01$  ,  $f_2 = 0,001$

### **Rapport de réduction**

$n_{red} = 1$  ;

### **Coefficient de torsion**

$k = 5000$  ;

### **Coefficient d'amortissement**

$d = 2$  ;

### **Etats initiaux**

$Vit\_m0 = 0,0$  Rad/s ;  $Vit\_c0 = 0,0$  Rad/s ;  $Pos\_m0 = 0,0$  ;  $pos\_c0 = 0,0$

### **Paramètre des roulements**

$n\_billes = 50$  ;  $BD = 0,03$  ;  $PD = 0,2$  ;  $beta = 0,5$  ;  $amp\_0 = 30$  ;  $t\_roul = 3s$  ;  $t\_engre = 10,0$  s;

### **Control Vectoriel**

Coef\_Park = sqrt (2/3) ; Sigma = 1-Lm x Lm/Lr/Ls ; tau\_s = Ls / Rs ; Rr\_com = 0,0126  $\Omega$  ;

Lr\_com = 0,001286 H; Ls\_com = 0,001314 H; Lm\_com = 0,00123 H;

### **Onduleur**

G\_ond = 1 ; Vmax = 350/2 ;

### **Contrôle de la vitesse**

puls\_nat\_vit = 100 ; amort\_vit = 0,7 ; Cmax = 150 N.m ;

### **Engrenages**

amp\_eng = 10 ; k\_eng = 2 ; Nm\_eng = 200 ;

### **Rapport de réduction**

N1 = 100, N2 = 150

### **Ordre du développement en série de Fourier**

Ord = 2; n\_dents = 1; t\_def = 10s