

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2022



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Automatique

Spécialité: Automatique et Informatique industrielle

Par: (GHELIS AYMEN et MOUSSAOUI MEJDI)

Thème

Diagnostic et pronostic du défaut de rupture d'isolement dans les machines électriques

Soutenu publiquement, le 19/06 /2022 , devant le jury composé de:

M. BABOURI Abd salam	Professeur	Univ. Guelma	Président
M. MOUSSAOUI Abdelkrim	Professeur	Univ. Guelma	Encadreur
M. TOUATI Said	Directeur de recherche	CRNB Djelfa	Co-Encadreur
Mme. CHAABI Lilia	MCB	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement, le bon DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Pr. MOUSSAOUI ABD El krím, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de nous donner ses conseils et remarques.

Nous adressons également nos sincères remerciements à M. Touati Saïd, co-encadreur de ce mémoire pour l'accueil chaleureux et l'hospitalité au niveau du Centre de Recherche BIRINE CRNB, pour sa disponibilité et ses précieux conseils pendant du stage effectué au CRNB.

Enfin, nous tenons également à remercier tous ceux qui nous ont aidés durant cette étape de la réalisation de ce mémoire et tous nos collègues de l'université de Guelma

Nos remerciements s'adressent également à toutes nos familles, et tous Nos amis pour leur aide et leur soutien

Dédicaces

Je dédie ce travail :

*A mes chers parents, pour leur soutien et leur confiance, que Dieu les
bénisse avec une bonne santé et longue vie*

A mes frères

A mes soeurs

A toute ma famille

A tous mes amis et collègues

A tous ceux que j'aime

Aymen

Dédicaces

Je dédie ce travail :

*A mes très chers parents, pour leur soutien et leur confiance, que Dieu,
leur procure santé et longue vie.*

A mes frères

A toute ma famille

A tous mes amis et collègues

A tous ceux que j'aime

mejdî

Résumé

Ce projet de fin d'études porte sur la détection et le diagnostic des défauts stator et rotor qui affectent le fonctionnement normal des machines électriques, et explique les méthodes de techniques pronostic et leur importance dans la maintenance préventive. Ce travail présente un modèle mathématique des machines asynchrones, centré sur le problème du défaut de court-circuit. En plus d'expliquer l'application de méthodes prédictives pour surveiller la dégradation des roulements dans les moteurs à cage d'écureuil dans le but d'estimer la durée de vie restante (RUL) après la détection d'un défaut.

Abstract

This graduation project focuses on the detection and diagnosis of stator and rotor faults that affect the normal operation of electrical machines, and explains the methods of prognostic techniques and their importance in preventive maintenance. This work presents a mathematical model of asynchronous machines, centered on the short-circuit fault problem. In addition to explaining the application of predictive methods to monitor bearing degradation in squirrel cage motors for the purpose of estimating remaining life (RUL) after detection of a fault.

ملخص

يركز مشروع التخرج هذا على كشف وتشخيص أعطال الجزء الثابت والعضو الدوار التي تؤثر على التشغيل الطبيعي للآلات الكهربائية، كما يشرح طرق تقنيات التنبؤ وأهميتها في الصيانة الوقائية. يقدم هذا العمل نموذجًا رياضيًا للآلات غير المتزامنة، يتمحور حول مشكلة خطأ ماس كهربائي. بالإضافة إلى شرح تطبيق الأساليب التنبؤية لمراقبة تدهور المحامل في محركات قفص السنجاب بغرض تقدير العمر المتبقي (RUL) بعد اكتشاف الخطأ.

Table des matières

INTRODUCTION GENERAL.....	1
Chapitre 1 : méthodes de diagnostic et de pronostic des machines asynchrones.....	4
I.1. Introduction	5
I.2 Constitution de la machine asynchrone	5
I.2.1 Le stator	6
I.2.2 Le rotor	7
I.2.3 Les paliers	7
I.3 Etude des défaillances dans les machines électriques	8
I.4 Présentation des différentes défaillances	8
I.4.1 Défaillances au rotor	8
I.4.1.1 Ruptures de barres	8
I.4.1.2 Ruptures D'Anneaux.....	9
I.4.1.3 Défaut de roulements	9
I.4.1.4 Défaut d'excentricité	11
I.4.2 Défaillances au stator	12
I.4.2.1 Défaut d'isolants dans un enroulement	12
I.4.2.2 Court-circuit entre spires	13
I.4.2.3 Court-circuit entre phases.....	14
I.4.2.4 Court-circuit phases-bâti	14
I.5 Méthodes de diagnostic.....	17
I.5.1 Méthodes à base de modèles.....	17
I.5.2 Méthode sans modèle	17
I.5.2.1 Diagnostic par analyse du courant statorique	18
I.5.2.2 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite.....	18
I.5.2.3 Diagnostic par analyse des vibrations mécaniques.....	18
I.5.2.4 Méthode par intelligence artificielle (IA)	19
I.5.2.5 Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic.....	20
I.5.2.5.1 Transformée de Fourier rapide (FFT).....	20

I.5.2.5.2 Transformée en Ondelette (TO)	21
I.6 Définition de pronostic.....	22
I.6.1 Lien entre pronostic et diagnostic.....	22
I.7 Classification des Approches de Pronostic.....	23
I.7.1 Pronostic basé sur un modèle physique	24
I.7.1.1 Espace de parité.....	25
I.7.1.2 Observateurs	25
I.7.1.3 Estimation paramétrique.....	25
I.7.2 Approches guidées par les données.....	26
I.7.2.1 Techniques statistiques.....	27
I.7.2.2 Approche par analyse des séries temporelles.....	27
I.7.2.3 Techniques de régression.....	27
I.7.2.4 Autorégressif à moyenne mobile intégrée (ARIMA)	27
I.7.2.5 Approches à base d'intelligences artificielle.....	28
I.7.3 Approches basées sur l'expérience.....	29
I.8 Estimation du temps de la vie restante (RUL).....	30
I.9 Conclusion.....	32
Chapitre 2 : modélisation de défaut de la machine asynchrone.....	33
II.1 Introduction.....	34
II.2 Modélisation du fonctionnement de la machine saine	34
II.2.1 Hypothèses de départ.....	34
II.2.2 Modèle mathématique de la MAS.....	34
II.2.2.1 Equations électriques de la machine asynchrone.....	34
II.2.2.2 Equations magnétiques	36
II.2.2.3 Equations mécaniques de la machine.....	37
II.2.2.4 Choix du référentiel.....	38
II.2.2.5 Modèle de Park	38
II.2.2.5.1 Equations du flux	40
II.3 Modélisation du défaut statorique de type court-circuit.....	40

II.3.1 Représentation d'état du modèle de défaut	43
II.3.2 Résultats de simulation de défaut de court-circuit statorique	44
II.3.2.A. Démarrage à vide de la machine asynchrone triphasée.....	44
II.3.2.B Application d'une charge en régime permanent.....	47
II.3.2.C Scénario d'absence de la phase (A)	50
II.4 Défaut rotorique du type rupture de barres	53
II.5 Conclusion.....	56
Chapitre 3 : Pronostic des défauts de roulements dans une machine.....	57
III.1 Introduction.....	58
III.2 Présentation du banc expérimental.....	58
III.2.1 Premier test	59
III.2.2 Deuxième test.....	60
III.3 Exploitation des résultats	61
III.4 Approche pour le pronostic de l'état des roulements (détermination de TSP et RUL),	67
III.4.1 Calcul du TSP et le RUL.....	67
III.5 Conclusion.....	71
CONCLUSION GENERAL.....	72
BIBLIOGRAPHIE	73

Liste des figures

Figure I.1: Eléments de constitution de la machine asynchrone.....	5
Figure I.2: stator d'une machine asynchrone.....	6
Figure I.3: rotor de la machine asynchrone triphasée a cage.....	7
Figure I.4 : défaut de rupture de barre et d'anneau.....	9
Figure I.5 : roulement à bille.....	11
Figure I.6 : Défaut d'excentricité dynamique et statique.....	12
Figure I.7 : Photos d'un dégât dus au défaut de court-circuit entre spire.....	13
Figure I.8 : Exemple de dégâts provoqués par les défauts de court-circuit statoriques.....	15
Figure I.9 : Représentation de court-circuit entre spires, entre phases, phase et terre.....	15
Figure I.10 : Mesures vibratoires sur la machine asynchrone.....	19
Figure I.11 : Représentation temporelle vers fréquentielle.....	20
Figure I.12 : transformation en ondelette.....	21
Figure I.13 : pronostic vs diagnostic.....	23
Figure I.14 : Classification des Approches de pronostic.....	24
Figure I.15 : Structure d'un système de pronostic à base d'un modèle.....	25
Figure I.16 : Structure d'un système de pronostic orienté données.....	28
Figure I.17 : détermination du temps de vie restant par le suivi de la tendance d'un paramètre de Surveillance.....	31
Figure II.1 : Position des axes d q par rapport aux axes de la machine.....	39
Figure II.2 : Modèle de court-circuit dans le repère lié au stator.....	43
Figure II.3 : fonctionnement à vide avec application le défaut (6%) à l'instant $t=2s$	45
Figure II.4 : fonctionnement à vide avec application le défaut (12%) à l'instant $t=2s$	47
Figure II.5 : fonctionnement en charge ($C_r = 10N.m$ à l'instant $t = 1s$) avec application le défaut (6%) à l'instant $t = 2s$	49
Figure II.6 : fonctionnement en charge ($C_r = 10N.m$ à l'instant $t = 1s$) avec application le défaut (12%) à l'instant $t = 2s$	50
Figure II.7 : fonctionnement à vide avec l'absence de la phase (A) a l'instant $t=2s$	51

Figure II.8 : fonctionnement en charge ($C_r = 10\text{N.m}$ à l'instant $t = 1\text{s}$) avec l'absence de la phase (A) à l'instant $t=2\text{s}$	53
Figure II.9 : Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone.....	54
Figure III.1 Banc d'essai expérimental	59
Figure III.2 l'organigramme représenté les principes processus du pronostic	60
Figure III.3 signal vibratoire en fonction du temps.....	62
Figure III .4 Représentation fréquentielle - temporelle de la dégradation.....	63
Figure III.5 Filtrage de paramètre de l'indicateur de Santé	64
Figure III.6 Monotonie des indicateurs.....	64
Figure III.7 : l'évolution des paramètres de santé pour les roulements en défaut à partir du signal vibratoire L'axe des abscisses sont des temps en second	66
Figure III .8 Organigramme représente les démarches pour la détection TSP et RUL.....	69
Figure III .9 Evolution de paramètre de santé et le seuil de défaut.....	70

Liste des tableaux

TAB I.1 les causes des défauts rotoriques et statoriques de machine asynchrone	16
TAB I.2 : Approches de pronostic et type d'information nécessaire.....	30
TAB III.1 les principaux indicateurs de dégradation.....	61

Liste des symboles

$[V_s]$: Vecteurs des tensions statoriques

$[V_r]$: Vecteurs des tensions rotoriques

$[I_s]$: Vecteurs des courants statoriques

$[I_r]$: Vecteurs des courants rotoriques

$[\Phi_s]$: Vecteurs des flux statoriques

$[\Phi_r]$: Vecteurs des flux rotoriques

$[R_r]$: Matrices des résistances rotoriques.

$[R_s]$: Matrices des résistances statoriques.

$[L_s]$: Inductances propres statoriques

$[L_r]$: Inductances propres rotoriques

$[M_r]$: inductance mutuelle entre deux phases du rotor

$[M_s]$: Inductance mutuelle entre deux phases du stator

$[M_{sr}]$: l'inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor

C_{charge} : couple de charge

C_{em} : couple électromagnétique

θ : angle mécanique dans le repère fixe du stator

J : Moment d'inertie des parties tournantes

Ω_m : vitesse angulaire mécanique du rotor ($\Omega_m = p\omega$).

ω : pulsation mécanique

ω_r : pulsation mécanique du rotor

P : nombre de paires de pôles

ω : pulsation mécanique

θ_r : position angulaire du rotor

θ_s : position angulaire du stator

t : temps

L_m : inductance magnétisante

L_f : inductance de fuite

θ_{cc} : angle du bobinage en court-circuit

R_s : Résistance propre d'une phase statorique

n_{cc} : nombre de spires en court-circuit

n_s : nombre de spires sur une phase saine

μ_{cc} : pourcentage de spires en court-circuit

$\underline{u}_{\alpha\beta_s}$: tensions statoriques sur les deux axes α et β

$\underline{u}_{\alpha\beta_r}$: tensions rotoriques sur les deux axes α et β

R_r : la résistance propre d'une phase rotorique

ω_m : la pulsation mécanique

θ_{cc} : angle de repère du bobinage en court-circuit

$\phi_{\alpha\beta_f}$: flux magnétisant

$\underline{\phi}_{\alpha\beta_m}$: flux de fuite statorique

θ_0 : angle repérant le défaut

ABBREVIATIONS

MCSA : Motor Current Signature Analysis

IA : Intelligence Artificielle

PSO : Particle Swarm optimization

SVM : Support Vector Machine

FFT : Fast Fourier Transform

TO : Transformée en Ondelette

ISO : L'organisation internationale de normalisation

AR: Auto-Regressive models

ARMA: Auto-Regressive Moving Average models

ARIMA : Autorégressif à moyenne mobile intégrée

RNA : réseaux de neurones artificiels

RUL: Remaining Useful Life

TSP: Time to Start Prediction

SK : Spectral Kurtosis

INTRODUCTION GENERALE

GENERALITES

La machine asynchrone est l'une des machines électriques la plus utilisée dans le domaine industriel. Comme tout système électrique, les moteurs asynchrones sont soumis à de nombreuses opérations pendant le fonctionnement qui affectent leurs performances. Son l'état de ces moteurs électriques doit donc être surveillé. Parmi les défauts les plus fréquents, on distingue les défauts de court-circuit qui liés aux enroulements du stator, les défauts de cassures de barres, casseurs d'anneaux et des roulements liés au rotor. Ces derniers représentent presque 50% des défauts pouvant affecter le bon fonctionnement de la machine asynchrone.

L'indisponibilité d'une machine tournante dû à un défaut peut entraîner l'arrêt brutal de l'installation, ce qui peut être très coûteux. Par conséquent, différentes méthodes sont proposées pour surveiller l'état de ces systèmes.

Dans ce mémoire, nous nous intéressé à l'étude des principaux défauts pouvant avoir lieu dans une machine asynchrone. A savoir, les défauts au stator résultant d'une ouverture ou d'un court-circuit sur au moins une phase du stator, la cassure de barre ou d'anneau de court-circuit au rotor et les défauts des roulements.

En effet, pour la maintenance préventive des roulements par exemple, la prédiction de leur santé est une préoccupation majeure. On s'intéresse alors à la prédiction de la durée de vie utile restante (RUL), de ces roulements ce qui est utile pour l'organisation de leur maintenance et l'amélioration de la fiabilité globale du système.

La plupart des techniques développées pour estimer le RUL sont soit basées sur des données, soit sur des modèles. Dans ce mémoire, nous adoptons une approche basée sur les données expérimentales. Pour le pronostic de la santé des roulements, la technique utilisée consiste à sélectionner un modèle de régression approprié en fonction des tendances des données expérimentales.

Notre travail est justifié du fait que plusieurs études statistiques par des groupes industriels sont menées pour le recensement des défauts majeures dans les machines électriques. Ces études sont menées par différents groupes industriels. Ces défauts et leurs causes sont illustrés dans les figures (1) et (2).

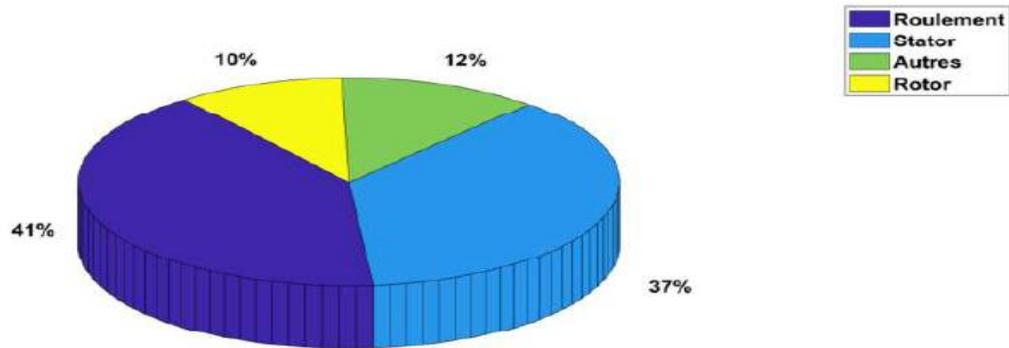


Figure (1) : Répartition des défauts

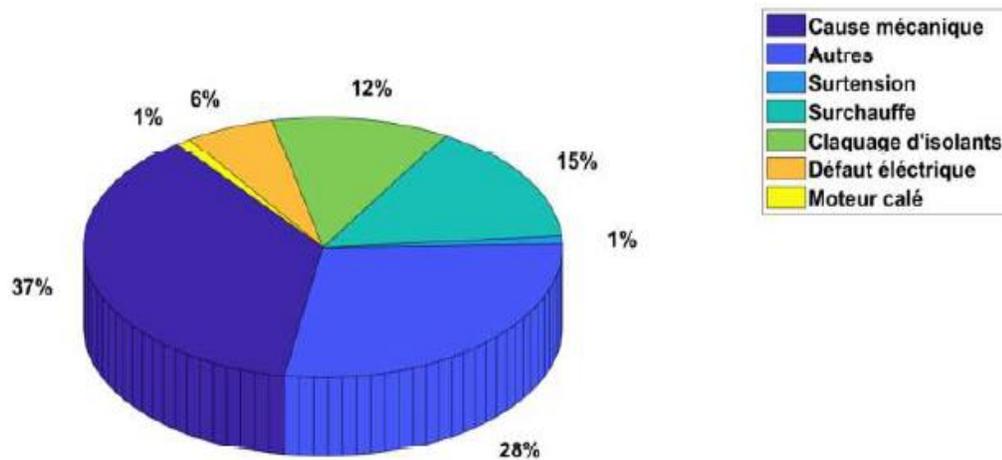


Figure (2) : Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone

Ce mémoire est organisé comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à l'étude des défauts affectant le fonctionnement des moteurs asynchrones. De même, nous avons présenté les différentes méthodes de détection, de diagnostic et de pronostic des défauts.
- Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone tout en considérant la modélisation des défauts électriques les plus fréquents. Et dans ce contexte, une simulation numérique est effectuée.
- Le troisième chapitre, la méthode de pronostic retenue pour la surveillance de l'état de santé des roulements de machines asynchrones est développée d'une manière détaillée. Et dans ce contexte, les notions de TSP et RUL sont bien mis en évidence.

Et enfin, nous clôturons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I :
Méthodes de diagnostic
et de pronostic des
machines asynchrones

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente la Constitution de la machine asynchrone et Les principaux défauts qui affectent le bon fonctionnement de la machine asynchrone, Nous abordons également les techniques base couramment utilisées pour la détection et le diagnostic des défauts.

De même, nous expliquons dans ce chapitre la notion de pronostic, et sa relation avec le diagnostic, ainsi que les différentes méthodes y afférentes.

I.2 Constitution de la machine asynchrone

En général, la machine asynchrone est constituée des principaux éléments montrés sur la figure (I.1) [2] [8] :

- Le stator, partie fixe constituée de disques en tôles magnétique portant les enroulements chargés De magnétiser l'entrefer
- Le rotor, partie tournante qui permet la transmission du mouvement et de mettre en rotation la charge mécanique.
- Les paliers, la partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur et l'entraînement des charges.

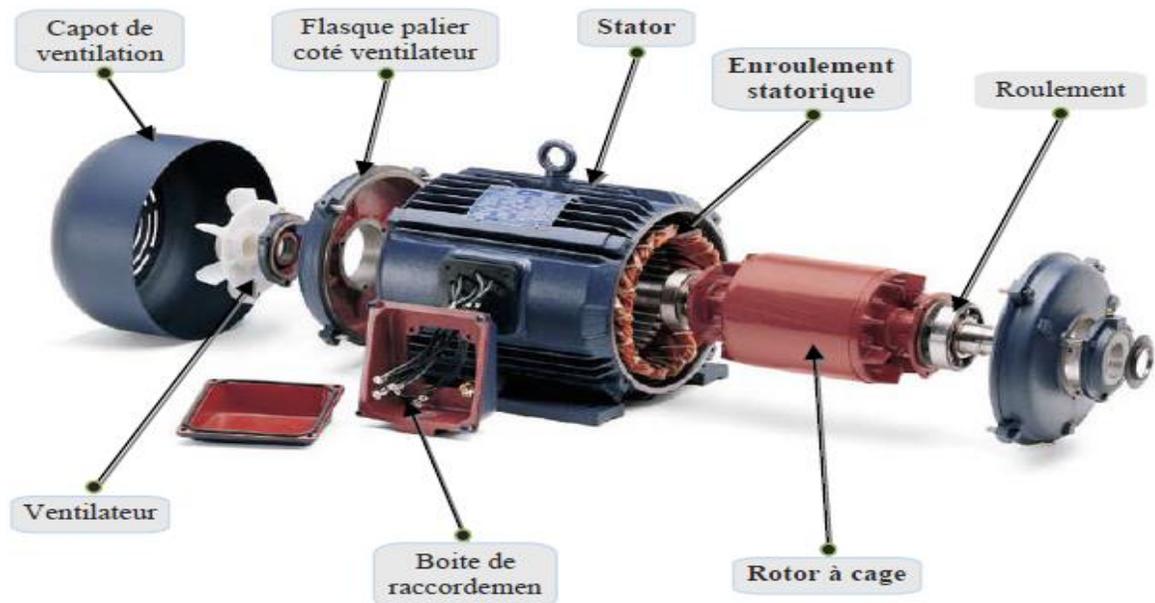


Figure I.1: Eléments de constitution de la machine asynchrone [6].

I.2.1 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. Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines [12].

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 [12].

Les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet, Ces enroulements peuvent être insérés de manière imbriquée, ondulée ou encore concentrique [7].

L'enroulement concentrique est souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement. L'isolation entre les enroulements et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de différents types suivant l'utilisation de la machine asynchrone [7].

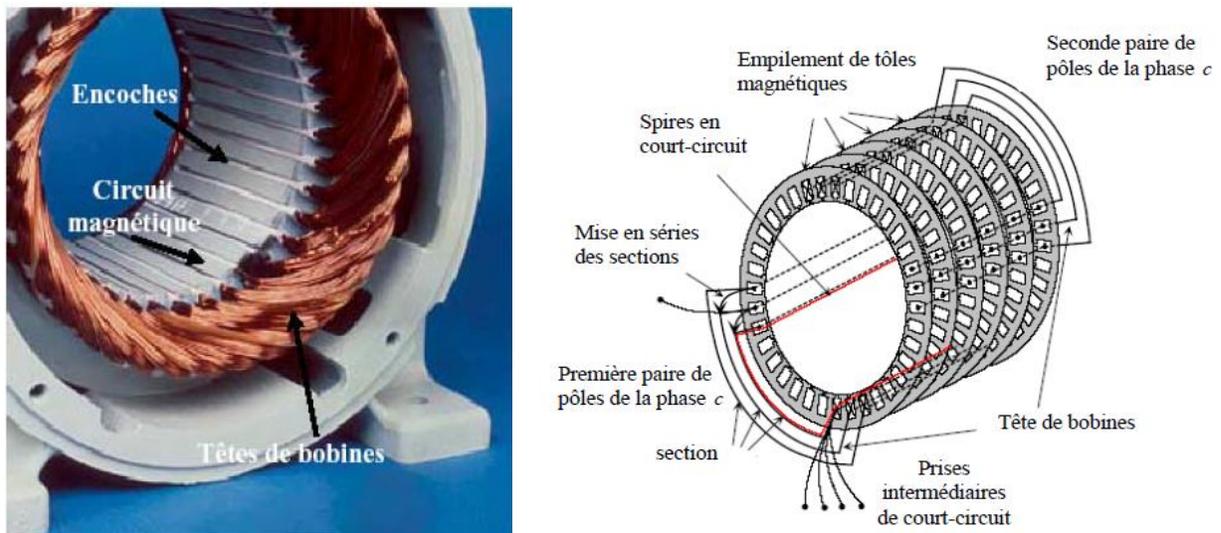


Figure I.2: stator d'une machine asynchrone [11].

1.2.2 Le rotor

Le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Les rotors de machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage d'écureuil [5].

Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique. Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine [7].

Dans le cas des 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. Généralement il n'y a pas d'isolation entre les barres rotoriques et le circuit magnétique. Mais la résistivité de l'alliage utilisé pour la construction de cette cage est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre. 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 [10].

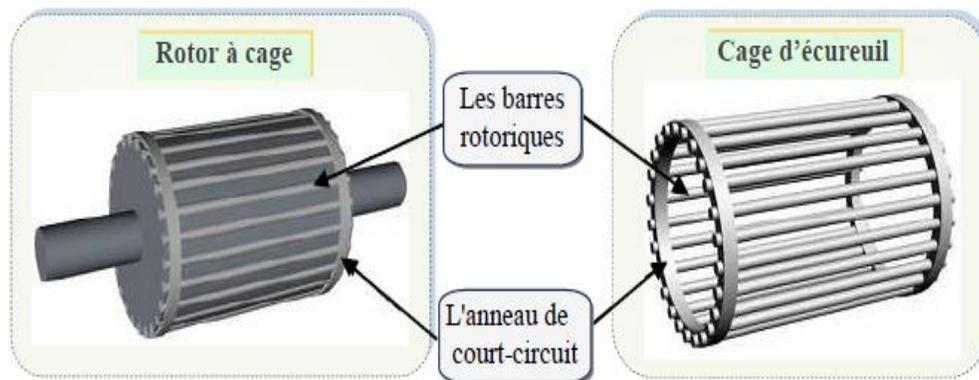


Figure I.3: rotor de la machine asynchrone triphasée a cage [6].

I.2.3 Les paliers

Les paliers sont constitués de roulements à billes et de flasques. Les roulements assurent le guidage en rotation libre de l'arbre. Les flasques, moulés en alliage de fonte, sont fixés sur le carter statorique. L'ensemble ainsi établi constitue, alors, la machine asynchrone [8].

I.3 Etude des défaillances dans les machines électriques

Les causes des défauts sont multiples. Elles peuvent être classées en trois groupes [5] :

- Groupe A : Surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc.
- Groupe B : Surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement.... etc.
- Groupe C : Les erreurs humaines, défauts de fabrication, défectuosité des composants, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine.

I.4 Présentation des différentes défaillances

I.4.1 Défaillances au rotor

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit [4] :

- Rupture de barres ;
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit ;
- Excentricité statique et dynamique ;
- Un défaut de contact balai - bague dans le cas d'un rotor bobiné.

I.4.1.1 Ruptures de barres

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. 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, 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 [12].

I.4.1.2 Ruptures D'Anneaux

La rupture d'une portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme, il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité...etc.) ou une surcharge de couple peuvent entraîner leur cassure.

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques. De ce fait, elle engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaires à celui provoqué par la cassure de barres [13].

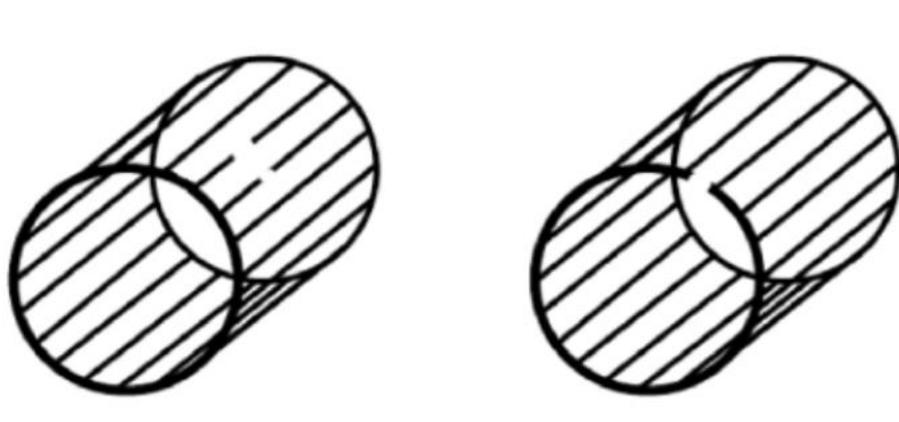


Figure I.4 : défaut de rupture de barre et d'anneau [7].

I.4.1.3 Défaut de roulements

Les roulements se composent généralement de deux bagues, une intérieure et une extérieure entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants (figure ()). En fonctionnement normal, la défaillance due à la fatigue commence par des petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface. Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations qui génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences [18].

$$f_{\text{roul}} = |f_s - kf_v| \quad (\text{I.1})$$

D'où : $k=1,2,3,\dots$, et f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations.

Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par un défaut et sont liées aux paramètres du roulement.

Selon [9], les fréquences des vibrations qui caractérisent les défauts des roulements à bille sont :

➤ **Défauts au niveau d'une bille :**

$$f_b = \frac{PD}{BD} f_{\text{rot}} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right)^2 \right] \quad (\text{I.2})$$

➤ **Défauts sur la bague intérieure :**

$$f_{b.\text{int}} = \frac{n_b}{2} f_{\text{rot}} \left[1 + \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (\text{I.3})$$

➤ **Défauts sur la bague extérieure :**

$$f_{b.\text{ext}} = \frac{n_b}{2} f_{\text{rot}} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right) \right] \quad (\text{I.4})$$

f_{rot} : La fréquence de rotation du rotor.

BD : Le diamètre d'un élément roulant.

PD : La distance entre les centres des billes diamétralement opposées.

n_b : Le nombre d'éléments roulants.

β : Angle de contact des billes avec les bagues du roulement.

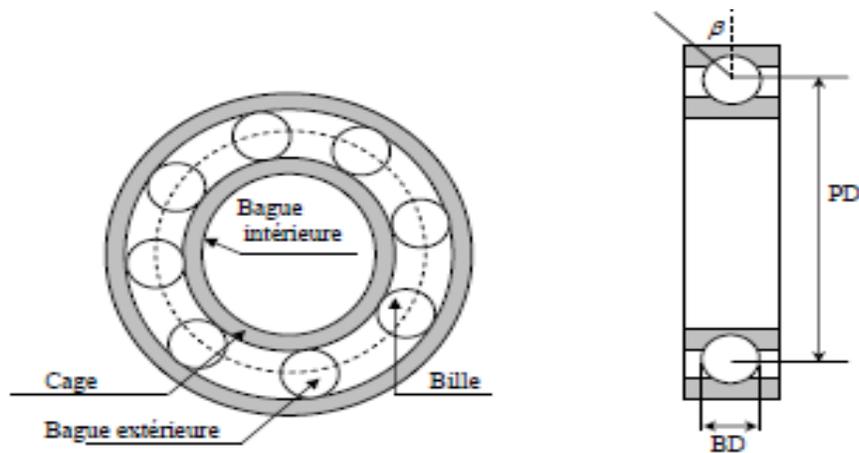


Figure I.5 : roulement à bille [3] [9].

I.4.1.4 Défaut d'excentricité

Un défaut d'excentricité dans une machine électrique correspond à un décentrement du rotor par rapport au stator, entraînant une variation de l'entrefer. Il existe trois types de défaut d'excentricité [5] :

- **L'excentricité statique** correspondant au cas où l'axe de rotation du rotor reste fixe mais ne coïncide pas avec l'axe de symétrie du stator.
- **L'excentricité dynamique** correspondant au cas où l'axe de rotation du rotor n'est pas fixe mais tourne autour de l'axe de symétrie du stator
- **L'excentricité mixte** : qui est une combinaison d'excentricités statique et dynamique.



Figure I.6 : Défaut d'excentricité dynamique et statique [7].

I.4.2 Défaillances au stator

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit [4] :

- Défaut d'isolant.
- Court-circuit entre spires.
- Court-circuit entre phases.
- Court-circuit phase/bâti.

I.4.2.1 Défaut d'isolants 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 [14]. Les différentes causes pour ce type de défaut sont [15] :

- Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.

- Vibrations mécaniques.

Vieillessement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée.

Même dans une utilisation « normale », l'isolant finit naturellement par se dégrader.

- Fonctionnement dans un environnement sévère.

I.4.2.2 Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spire de même phase entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence, une augmentation de la température au niveau du bobinage, et de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer un deuxième court-circuit. Il faut aussi prendre en compte que des spires en court-circuit engendrent un couple résistant, dû aux courants induits par le flux d'excitation circulant et les mutuelles de la machine en fonctionnement. Ce couple résistant est une valeur à caractériser, pour en prévoir les conséquences sur le fonctionnement, suite à la panne de la machine. Le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique, hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [19].

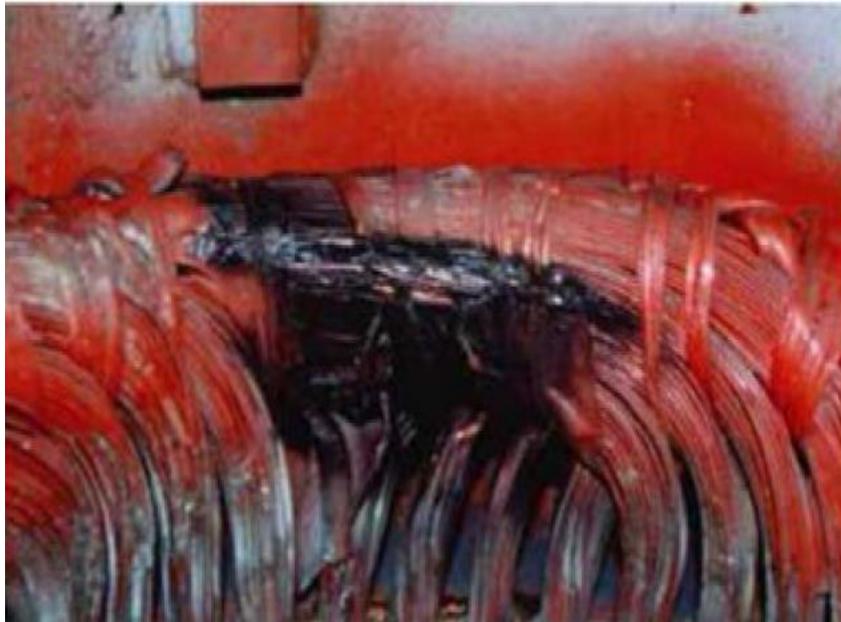


Figure I.7 : Photos d'un dégât dus au défaut de court-circuit entre spire [5].

I.4.2.3 Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système. L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections.

D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs. Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases [15].

I.4.2.4 Court-circuit phases-bâti

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit.

Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels). En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas.

Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement [16].

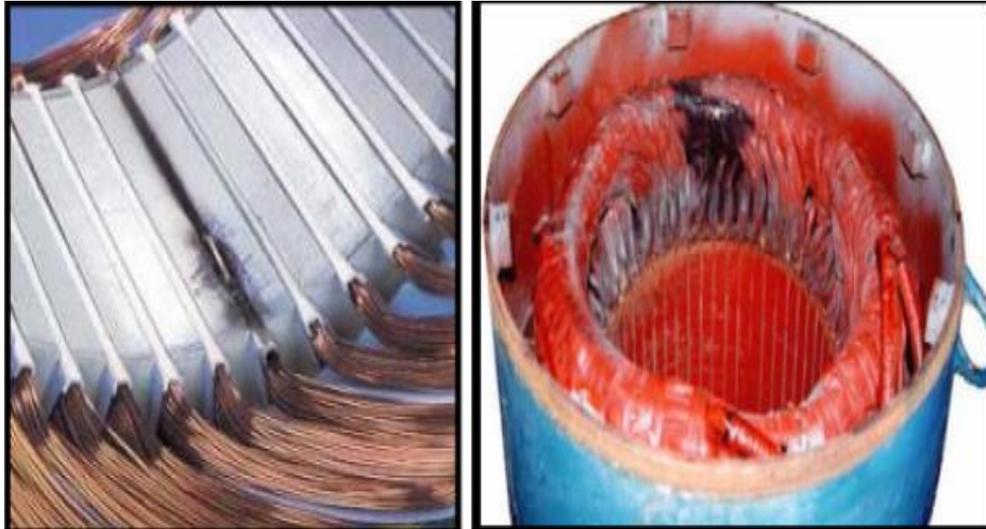


Figure I.8 : Exemple de dégâts provoqués par les défauts de court-circuit statoriques [5].

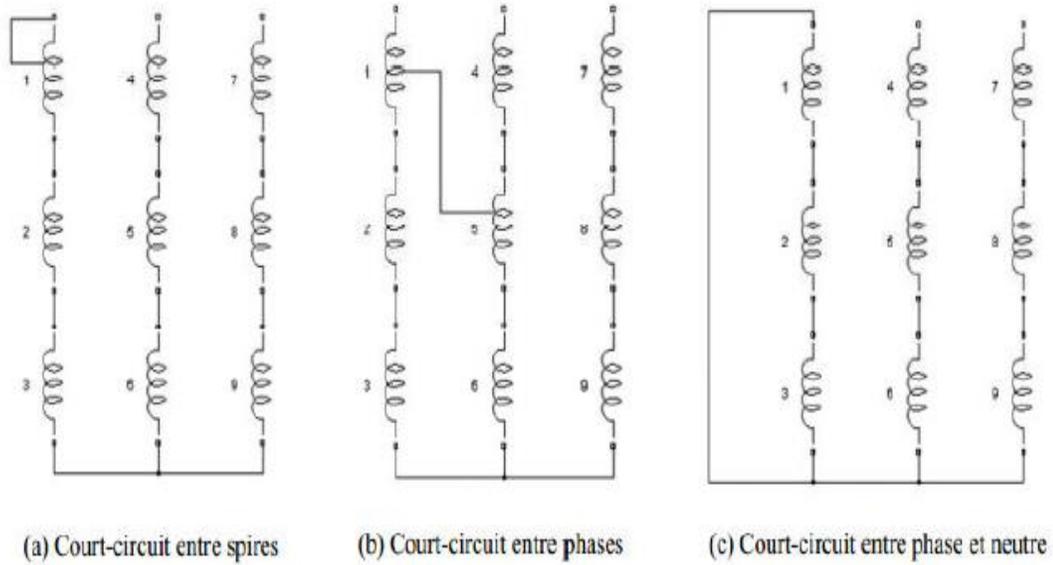


Figure I.9 : Représentation de court-circuit entre spires, entre phases, phase et terre [5].

	Défauts	Causes
Défauts statoriques	Vibration du support	Un déséquilibre magnétique, mouvement des enroulements, un déséquilibre de l'alimentation, surcharge, mauvaise installation, un contact avec le rotor.
	Un défaut entre le stator et la carcasse	Ecrasement des spires par la carcasse, le cycle thermique, une abrasion de l'isolant, présence de points anguleux dans les encoches, un choc.
	Défaut d'isolation	Endommagement de l'isolant lors de l'insertion des enroulements, démarrage fréquent, condition de température ou d'humidité extrême.
	Court-circuit inter spires	Température excessive, humidité, vibration, surtension.
	Court-circuit inter phases	Défaut d'installation, haute température, alimentation déséquilibrée, contrainte d'écrasement au niveau des enroulements.
	Déplacement des conducteurs	Choc dû à un défaut, démarrage fréquent, vibration des têtes de bobines.
	Défaillance des connecteurs	Ecrasement des conducteurs, vibration excessive.
Défauts rotoriques	Défaut de roulements	Mauvaise installation, déséquilibre magnétique, perte de lubrifiant, haute température, manque de propreté, charge déséquilibrée.
	Rupture de barres	Déséquilibre magnétique, régime transitoire à longue durée, fatigue thermique.
	Défaut du circuit magnétique	Défaut de fabrication, fatigue thermique, surcharge.
	Désalignement des roulements	Défaut de couplage, surcharge, mauvaise installation, jeu au niveau des paliers.
	Désalignement du rotor	Mauvaise installation, déséquilibre magnétique, défaut de roulements.
	Roulements mal lubrifiés	Température excessive, mauvaise qualité de lubrifiant.
	Déséquilibre mécanique	Mouvement des anneaux de court-circuit, problème d'alignement.

TAB I.1 : les causes des défauts rotoriques et statoriques de machine asynchrone [7].

I.5 Méthodes de diagnostic

L'apparition d'un défaut au niveau de l'entraînement modifie le fonctionnement de ce dernier, ce qui affecte ses performances. Etant donnée la diversité de ces défauts et la complexité des relations cause à effet, de nombreuses méthodes, permettent de réaliser une démarche de diagnostic et de prévenir au mieux la dégradation du système surveillé, ont été développées. Dans cette partie, nous allons faire une présentation des différentes méthodes de détection [29].

I.5.1 Méthodes à base de modèles

Les méthodes de diagnostic à base de modèles (connues aussi comme diagnostic à partir de principes premiers) sont appropriées quand l'information disponible sur le processus permet d'utiliser les principes physiques du processus et leur compréhension. Selon la connaissance du processus, il est possible de définir deux formulations différentes de cette approche à base de modèles [17] :

- Approche basé sur des modèles quantitatifs.
- Approche basé sur des modèles qualitatifs.

I.5.2 Méthode sans modèle

Ces méthodes sont basées soit sur le traitement de signaux issus de capteurs de grandeurs physiques affectées par les défauts ou soit par des systèmes experts mettant en œuvre des techniques d'intelligence artificielle. Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'information, on est obligé d'aller vers les techniques de traitement de signal.

Les méthodes se basant sur l'analyse des signaux d'acquisition ont l'avantage d'être indépendante des fluctuations internes du système. Ainsi, l'information contenue dans les signaux n'est pas affectée par une éventuelle erreur de modélisation.

Plusieurs techniques de traitement de signal sont 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. [18].

I.5.2.1 Diagnostic par analyse du courant statorique

Parce qu'il est facilement accessible, et vue sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis). La MCSA est l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain [18].

I.5.2.2 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Dans une machine idéale et sans défauts, 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. Le contenu spectral de la tension induite dans cette bobine, peut être exploité pour détecter les différents défauts [1].

I.5.2.3 Diagnostic par analyse des vibrations mécaniques

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.

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B_s^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (\text{I.5})$$

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer est le produit de la force magnétomotrice F_{mm} et de la perméance (P).

$$\psi_s = F_{mm} \cdot P \quad (\text{I.6})$$

Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radiale. Les spectres des signaux de vibrations issus du moteur avec défaut sont comparés avec ceux de références enregistrées lorsque la machine était en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques puisque la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer. Cependant, le coût des capteurs de vibration qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteurs (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode [18].

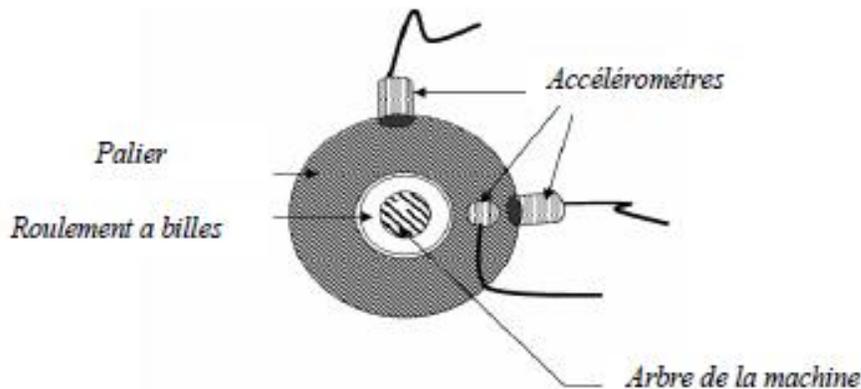


Figure I.10 : Mesures vibratoires sur la machine asynchrone [18].

I.5.2.4 Méthode par intelligence artificielle (IA)

L'intelligence artificielle imite l'intelligence humaine, inspirée des phénomènes de la nature, heuristique et évolutionnaire, est de plus en plus utilisée dans le domaine de la supervision et du diagnostic, elle a permis d'augmenter l'efficacité et la fiabilité du diagnostic. Elles exploitent les signatures avec ou sans modèle pour réaliser la supervision et le diagnostic du système. Elles ne nécessitent pas de modèle précis du système. Une véritable mutation des recherches vers ce genre de technique pour augmenter l'efficacité du diagnostic et la détection des défauts. En fait, l'Intelligence Artificielle comprend diverses techniques qui sont exploitées dans le domaine du diagnostic, telles que les systèmes experts, les réseaux de neurones, la logique floue, les algorithmes génétiques, les (PSO) Particle Swarm optimization, les (SVM) Support Vector

Machine et la reconnaissance des formes (Pattern Recognition), qui peuvent être utilisées de manière indépendante ou combinées pour améliorer l'efficacité du diagnostic [8].

I.5.2.5 Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic

A ce jour, c'est l'analyse fréquentielle des grandeurs mesurables qui est la plus utilisée pour le diagnostic de défaut, car la plupart des défauts connus peuvent être détectés avec ce type d'approche. Pour effectuer le diagnostic d'une installation industrielle, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de signaux, peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de la machine. Elles font toute partie de la famille des méthodes d'estimation spectrale non-paramétriques. Les méthodes courantes d'analyse des signaux de diagnostic en régime transitoire et en régime permanent sont le spectrogramme, l'analyse spectrale par FFT et les ondelettes [1].

I.5.2.5.1 Transformée de Fourier rapide (FFT)

Considérons le signal $X(t)$ à temps continu. Si X est à énergie finie, sa transformée de Fourier à la fréquence f est la suivante [18] :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-2\pi f t} dt \quad (\text{I.7})$$

Son inverse est donné par :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{-2\pi f t} df \quad (\text{I.8})$$

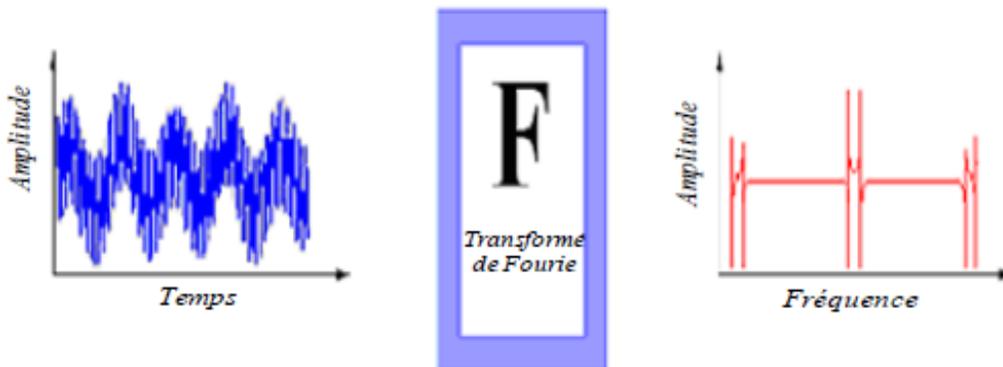


Figure I.11 : Représentation temporelle vers fréquentielle

Sa transformée de Fourier discrète de N points avec une période d'échantillonnage T est donnée par :

$$x\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(kT) e^{-\frac{2\pi f k T}{NT}} \quad (\text{I.9})$$

et sa relation inverse est donnée par :

$$x(kT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x\left(\frac{f}{NT}\right) e^{-j\frac{2\pi f k T}{NT}} \quad (\text{I.10})$$

I.5.2.5.2 Transformée en Ondelette (TO)

La transformée en Ondelette est un outil récent de traitement de signal. 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. 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 [18].



Figure I.12 : transformation en ondelette

I.6 Définition de pronostic

Le terme pronostic provient du grec « progignôskein » signifiant « connaître à l'avance ». Il a ensuite été essentiellement utilisé en médecine où il porte d'une part sur l'évaluation du degré de gravité d'une pathologie et d'autre part, sur l'estimation de l'évolution ultérieure de la maladie [23].

Dans le cadre de la maintenance des systèmes industriels, on distingue plusieurs définitions selon des objectifs différents et/ou des informations d'entrée différentes. Cette différence est particulièrement apparente dans la terminologie anglaise, qui offre plusieurs mots définissant ce terme, soit : "prognosis-prognostic-prognostics", là où la langue française ne propose que le terme pronostic [24].

L'organisation internationale de normalisation (ISO) 13381 a défini le pronostic comme étant une estimation de la durée de vie restante avant l'apparition d'un défaut et la détection de l'imminence d'un ou plusieurs défauts. Le pronostic détermine si un défaut est imminent et estime le temps restant avant son apparition. Les progrès d'aujourd'hui dans la maintenance préventive conditionnelle ont contribué à améliorer le pronostic sur l'état futur des systèmes. Cette avancée permet non seulement de réduire le coût lié à la maintenance mais aussi d'augmenter l'efficacité des interventions [29].

I.6.1 Lien entre pronostic et diagnostic

La maintenance préventive conditionnelle nécessite une approche prédictive. Celle-ci fournit au personnel de la maintenance une indication sur l'état futur du système et, idéalement, octroie un délai suffisant pour que le personnel, l'équipement et les pièces de rechange soient organisés, minimisant ainsi les temps d'arrêt et les coûts de maintenance. La figure (I.13) présente les étapes d'un processus de traitement d'un défaut éventuel au niveau d'un système. Le système est considéré comme étant en état de marche. Fonctionne au début, puis il y a une défaillance initiale dans le système. Au fil du temps, la gravité de la panne augmente jusqu'à ce que le système soit complètement dégradé. Si Le système est autorisé à continuer à fonctionner, il est possible de voir d'autres défauts [24].

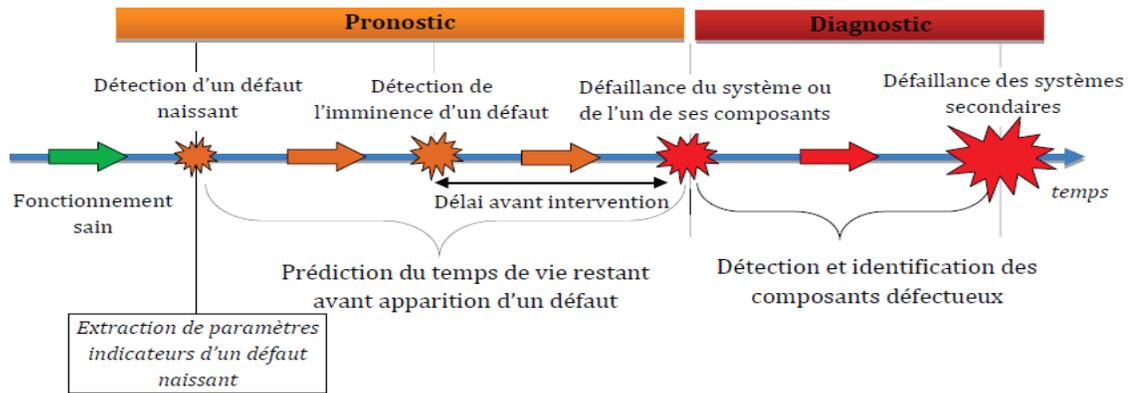


Figure I.13 : pronostic vs diagnostic [24]

Le processus de diagnostic se produit généralement lorsqu'un défaut se produit. Et/ou pendant l'intervalle de temps entre la panne du système et la panne du système auxiliaire. Cependant, si des défauts naissants peuvent être détectés à un stade précoce, des opérations de réparation peuvent être effectuées. La maintenance peut être alors retardée jusqu'à ce que l'état du système évolue vers un état plus dégénéré. Cet intervalle, depuis la détection d'un début de panne jusqu'à son apparition, définit le domaine (Temporel) du pronostic. Il fournit un intervalle suffisant, souvent appelé temps de la durée de vie restante entre la détection du défaut naissante et la défaillance du système.

Pour mettre à profit les avantages du pronostic, le personnel de la maintenance doit [24] :

- Disposer de techniques permettant de détecter et d'identifier un défaut naissant ;
- Avoir une estimation fiable du temps qui reste avant l'intervention, à savoir le temps restant avant l'apparition d'un défaut.

I.7 Classification des Approches de Pronostic

Il existe plusieurs méthodes de prévision d'état futur d'un système classées par catégories, qui sont la prédiction basée sur le modèle Physique, prédiction basée sur les données et le pronostic basé sur l'expérience.

Pour dissocier ces trois types des méthodes, les critères suivants sont considérés [29] :

- Le coût et la complexité de mise en œuvre.
- La précision des résultats obtenus, et l'applicabilité des méthodes.

La figure (I.14) résume les diverses méthodes de pronostic qui peuvent être appliquées aux différents systèmes et les coûts relatifs à leurs exploitations :

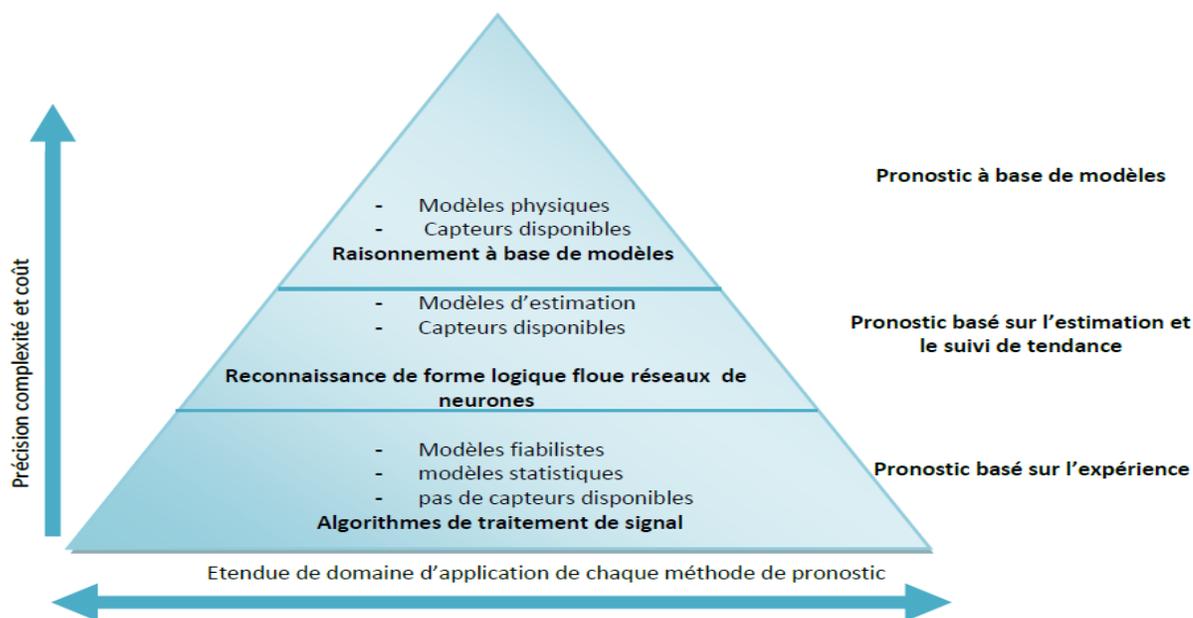


Figure I.14 : Classification des Approches de pronostic

I.7.1 Pronostic basé sur un modèle physique

Le pronostic basé sur un modèle physique utilise des représentations mathématiques pour intégrer une compréhension physique du processus de dégradation du système. Un schéma conceptuel du pronostic basé sur un modèle est représenté sur la figure (I.15). Les relations causales issues des lois de la physique sont utilisées pour modéliser les interactions entre les entités du système.

Ainsi, les résidus sont employés comme instruments mathématiques. De gros résidus dénotent la présence de défauts de fonctionnement, et des petits la présence de perturbations normales comme les bruits ou les erreurs de modélisation. L'utilisation de méthodes de pronostic basées sur un modèle implique des connaissances spécifiques liées à la défaillance ainsi qu'au mode de fonctionnement du système analysé. Le principe du pronostic basé sur les modèles physiques est de déterminer le niveau de dégradation courant du système (grâce aux processus de surveillance et de diagnostic) et d'évaluer le temps restant avant la défaillance en utilisant la courbe d'évolution de la dégradation en fonction de la sollicitation du système [25].

I.7.1.1 Espace de parité

Un espace de parité est une relation de redondance analytique représentée par une équation dans laquelle toutes les variables sont connues. La génération de telles relations permet d'engendrer des résidus. En l'absence de défaut, le résidu est statistiquement nul. Lors de l'apparition d'un défaut, son amplitude évolue de manière significative [25].

I.7.1.2 Observateurs

La génération de résidus à l'aide d'une estimation d'état consiste à reconstruire l'état ou, plus généralement, la sortie du processus à l'aide d'observateurs, et à utiliser l'erreur d'estimation comme résidu. Cette méthode s'est beaucoup développée car elle donne lieu à la conception de générateurs de résidus flexibles [25].

I.7.1.3 Estimation paramétrique

La méthode par estimation paramétrique considère que l'influence de défauts se reflète sur les paramètres et non pas uniquement, comme c'est le cas des observateurs, sur les variables du système physique. Le principe de cette méthode consiste à estimer en continu les paramètres du procédé en utilisant les mesures d'entrée/sortie et en évaluant la distance qui les sépare des valeurs de référence de l'état normal du procédé. L'estimation paramétrique possède l'avantage d'apporter de l'information sur l'importance des déviations. Toutefois, un des inconvénients majeurs de cette méthode réside dans la nécessité d'avoir un système physique excité en permanence. Ceci pose donc des problèmes d'ordre pratique dans le cas de procédés dangereux, coûteux ou fonctionnant en mode stationnaire [25].

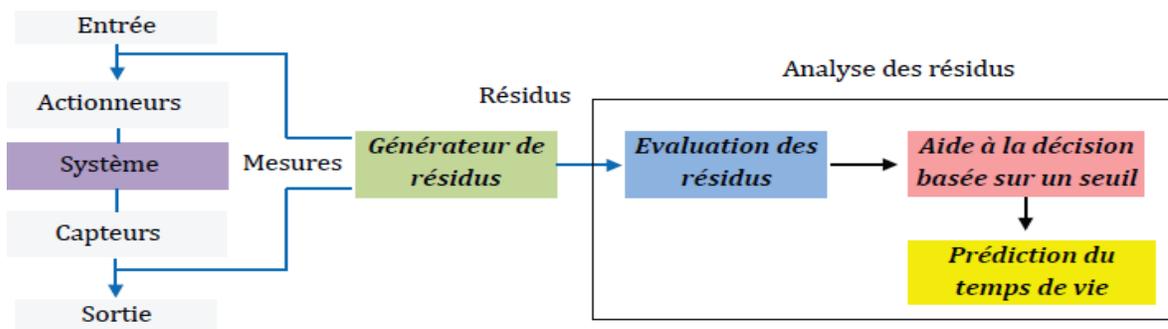


Figure I.15 : Structure d'un système de pronostic à base d'un modèle [24].

Les principaux avantages de cette approche sont :

- La flexibilité : si une des propriétés du système ou de la dégradation change, le modèle peut être réajusté pour prendre en compte cette modification.
- L'interprétabilité : la connaissance de la structure du modèle permet de relier la variation d'indicateurs à une modification de paramètre.

Les principaux inconvénients du pronostic basé sur les modèles physiques sont :

Le développement des modèles est extrêmement coûteux. Cela nécessite un niveau de qualification élevé et une expérience certaine.

- Il est difficile de construire un modèle global pour les systèmes complexes : complexité de modélisation des interactions entre les différents mécanismes, difficultés de calcul associées à la résolution d'un système d'équations différentielles.
- Il peut être impossible de généraliser une approche basée sur un modèle physique orientée « composant » à un niveau « système ».
- Il est nécessaire de connaître les mécanismes de dégradation et les facteurs influents sur celle-ci.

Les techniques appartenant à cette approche de pronostic sont basées sur les outils suivants : l'espace de parité, observateurs (filtres de Kalman) et estimation paramétrique.

I.7.2 Approches guidées par les données

Le pronostic guidé par les données se base sur l'hypothèse que les données de surveillance d'un système restent relativement inchangées jusqu'à l'apparition d'un défaut. Dans cette approche, la surveillance du système est effectuée à l'aide de paramètres de surveillance qui indiquent la dégradation du système. Les données recueillies sont d'abord analysées pour détecter d'éventuelles anomalies. Ensuite, l'évolution de la tendance des paramètres de surveillance est utilisée pour estimer le temps restant avant la défaillance du système en utilisant des algorithmes de prédiction. L'organigramme présenté sur la figure (I.16) résume les étapes de la mise en œuvre d'un pronostic guidé par les données [24].

I.7.2.1 Techniques statistiques

Les techniques statistiques les plus populaires sont les techniques de lissage (tel que le lissage exponentiel) et les modèles de régression, notamment les modèles AR (Auto-Regressive models) et ARMA (Auto-Regressive Moving Average models). Ces techniques présentent l'intérêt d'être simple à programmer. Cependant, elles supposent que la dégradation du système est monotone, et ne permettent pas d'intégrer les variations de conditions d'utilisation du système : l'évolution de la dégradation à venir doit être similaire à celle qui a été apprise [23].

I.7.2.2 Approche par analyse des séries temporelles

Si des quantités suffisantes de données en fonction du temps sont disponibles, les techniques d'analyse des séries temporelles sont souvent utilisées pour déterminer l'état du système en un point donné dans le futur. Ces techniques s'appuient fortement sur des données antérieures pour prédire les performances dans la future [29].

I.7.2.3 Techniques de régression

L'analyse par régression utilise les données existantes et détermine les relations, le cas échéant, entre le résultat mesurable et les variables qui contribuent à ce résultat. Un modèle général de régression linéaire est donnée par [29] :

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i,1} + \beta_2 X_{i,2} + \dots + \beta_{p-1} X_{i,p-1} + \varepsilon_i \quad i=1, \dots, n \quad (\text{I.11})$$

Y_i : Est une variable aléatoire indiquant la valeur de la réponse de l' $i^{\text{ème}}$ essai.

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{p-1}$: Sont les paramètres estimés.

$X_{i,1}, X_{i,2}, X_{i,p-1}$: Sont les valeurs du prédicteur.

ε_i : Est l'erreur aléatoire de moyenne = 0.

I.7.2.4 Autorégressif à moyenne mobile intégrée (ARIMA)

Les séries temporelles autorégressives à moyenne mobile intégrée (ARIMA) est une technique d'estimation d'état couramment utilisée dans le pronostic. Elle est également connue comme une analyse par tendance. Le modèle ARIMA est une construction générique qui intègre

des processus autorégressifs, processus à moyenne mobile, et une capacité à rendre compte des données non stationnaires [23].

Soit de Z_t , un processus AR d'ordre p défini mathématiquement comme :

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + \alpha_t \quad (\text{I.12})$$

Il est réécrit sous la forme :

$$\phi(B)Z_t = \alpha_t \quad (\text{I.13})$$

Z_1, Z_2, \dots, Z_n : sont les observations ordonnées en temps.

$\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$: Sont les paramètres inconnus d'un processus autorégressif.

α_t est un bruit blanc et B est l'opérateur retard respectivement.

I.7.2.5 Approches à base d'intelligences artificielle

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) (le perceptron multi couches, les réseaux de neurones probabilistes, les réseaux d'ondelettes à auto organisation, etc.) sont les principales classes d'outils de ce type. Leur force réside dans l'aptitude à apprendre et à capturer les relations subtiles entre données, même si ces relations sont inconnues ou difficile à décrire. En revanche, leur principal inconvénient réside dans l'acquisition et la couverture des données d'apprentissage [29].

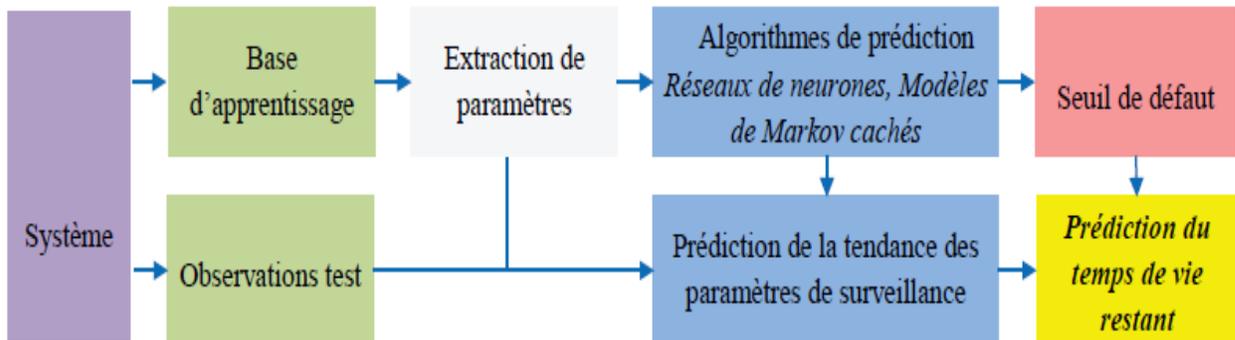


Figure I.16 : Structure d'un système de pronostic orienté données [24].

Avantages et inconvénients de cette approche :

La mise en œuvre d'une approche guidée par les données est relativement simple car elle ne requiert pas la connaissance formelle des mécanismes de dégradation. Elle permet de transformer simplement des données bruitées en informations pertinentes pour des décisions de pronostic. En outre, cette approche peut être adaptée à tout type d'application disposant de données suffisantes en quantité et qualité. En revanche, c'est là également sa principale limite : l'efficacité d'une approche de pronostic guidée par les données dépend fortement de l'existence de ces données opérationnelles. Par ailleurs, le processus de surveillance conditionne également la justesse du pronostic par sa capacité à fournir une estimation fiable et précise de l'état de santé courant du système [25].

I.7.3 Approches basées sur l'expérience

Les approches de pronostic basées sur l'expérience se fondent sur la modélisation stochastique des phénomènes de dégradation (loi de fiabilité, processus markoviens, ou non markoviens). Ces modèles peuvent être construits sur la base d'expériences similaires passées. Les approches basées sur l'expérience sont principalement issues des méthodes traditionnelles de modélisation et de traitement fiabilistes. Le pronostic est en ce sens assimilé à une étude de fiabilité prévisionnelle, l'objectif étant d'identifier les paramètres d'une distribution aléatoire décrivant le phénomène de dégradation ou de défaillance [23] [26] [27].

Avantages et inconvénients de cette approche

Le principal avantage de ce type d'approches est qu'elles ne nécessitent pas de connaissance pointue des mécanismes physiques de dégradation. Aussi, elles sont relativement simples à mettre en œuvre et peu coûteuses.

Les principales limites des approches basées sur l'expérience sont les suivantes :

- Il existe fréquemment un décalage entre les modèles mis au point (mono-composant à 2 états) et la réalité industrielle (système multi-composants à multi-états).
- Il est difficile de disposer d'un historique d'expérience passée représentatif de toutes les conditions d'utilisation des systèmes.

- Le manque de réactivité face au changement de comportement du système ou de l'environnement.

Le tableau suivant permet de juger les trois approches de pronostic par rapport au type d'information nécessaire à leur mise en œuvre [28] :

	Approche		
	Basée sur un modèle	Orientée données	Basée sur l'expérience
Modèle du système	<i>Nécessaire</i>	<i>Pas nécessaire</i>	<i>Pas nécessaire</i>
Historique des défaillances	<i>Utile</i>	<i>Nécessaire</i>	<i>Nécessaire</i>
Conditions passées	<i>Nécessaire</i>	<i>Nécessaire</i>	<i>Utile</i>
Conditions actuelles	<i>Nécessaire</i>	<i>Nécessaire</i>	<i>Utile</i>
Méthodes de reconnaissance des défaillances	<i>Nécessaire</i>	<i>Nécessaire</i>	<i>Pas nécessaire</i>
Historique de maintenance	<i>Utile</i>	<i>Pas nécessaire</i>	<i>Utile</i>
Capteur	<i>Nécessaire</i>	<i>Nécessaire</i>	<i>Pas nécessaire</i>

TAB I.2 : Approches de pronostic et type d'information nécessaire.

I.8 Estimation du temps de la vie restante (RUL) :

Il est possible d'estimer le temps de vie restante « Remaining Useful Life (RUL) » d'un système en prédisant l'évolution d'un paramètre de surveillance (figure (I.17)) par le biais de la prédiction de séries temporelles. La différence entre l'instant (t), où on débute le pronostic, et l'instant (t+RUL), où on diagnostique l'apparition d'un éventuel défaut en se basant sur la prédiction de la tendance des paramètres de surveillance, permet d'avoir une estimation du temps de vie restant (RUL) avant l'apparition du défaut.

Pour l'estimation du temps de vie restant RUL, on a détecté le temps de début prédictif « Time to start prediction (TSP) ». Nous supposons que le paramètre suit à un modèle de régression linéaire.

$$y = wx + b \quad (\text{I.14})$$

Le coefficient w représente le gradient de l'indicateur de santé.

Si pour chaque instant de temps t , $w_t \leq 0$, la machine est donc dans l'état bonne santé

Si $w_t > 0$, la machine est donc en début de dégradation.

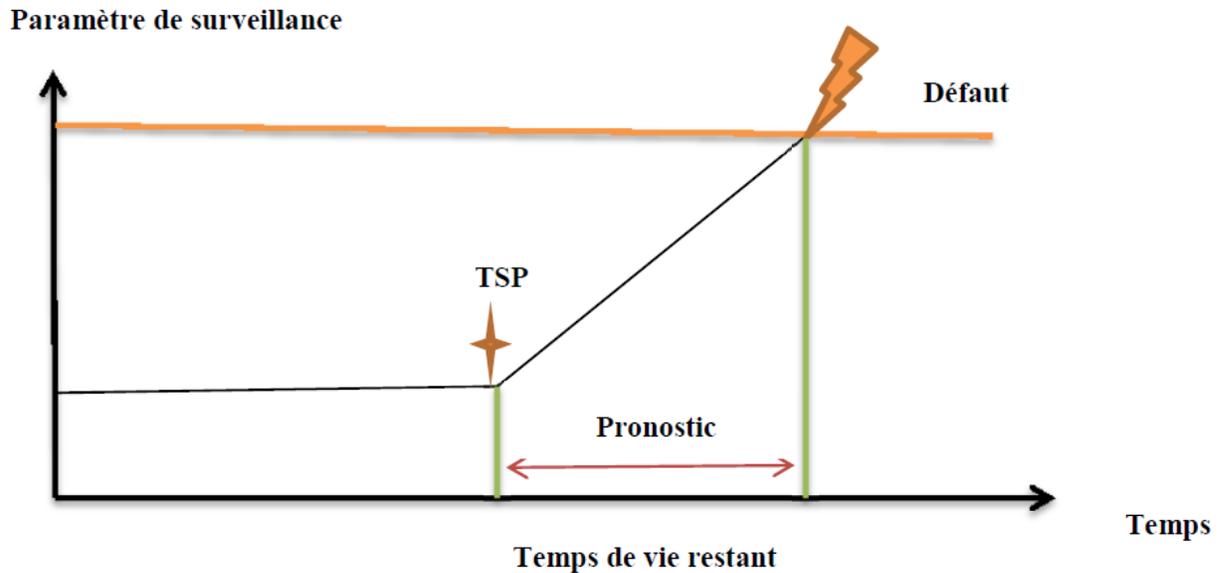


Figure I.17 : détermination du temps de vie restant par le suivi de la tendance d'un paramètre de Surveillance [29].

I.9 Conclusion

Après quelques rappels sur ce qui constitue une machine asynchrone, nous nous sommes intéressés à lister les principales défaillances qui surviennent dans les différentes parties de la machine ainsi que leurs causes et conséquences. Nous avons passé ensuite brièvement en revue quelques techniques de diagnostic pour la détection de défauts. De même, nous avons discuté du concept du pronostic utilisé pour connaître l'évolution de l'état de santé d'un système électrique. Et dans ce contexte, nous avons présenté les différentes approches de pronostic, leurs avantages et inconvénients et leurs applicabilités.

Chapitre II:
Modélisation de défaut
de la machine
asynchrone

II.1 Introduction

La modélisation des machines électriques est une étape importante pour le diagnostic des défauts. Dans ce chapitre nous reprenons l'équation électrique d'une machine asynchrone en mode sain et nous construisons un modèle de simulation du défaut de court-circuit à partir de Matlab.

II.2 Modélisation du fonctionnement de la machine saine

Dans cette section, nous allons considérer le cas d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. Le champ tournant induit des courants rotoriques dans les barres de la cage d'écureuil (ou bobinage): ces courants induits provoquent un couple permettant au rotor de tourner à une vitesse voisine de celle du champ tournant, mais nécessairement inférieure.

La mise en équation de la machine asynchrone avec les hypothèses retenues étant classique, nous ne mentionnerons que les points essentiels et les choix qui nous sont propres [6].

II.2.1 Hypothèses de départ

Le modèle de la MAS est établi en tenant compte des hypothèses de base suivantes :

- La machine est symétrique à entrefer constant,
- La répartition dans l'entrefer de la force magnétomotrice et du flux est sinusoïdale,
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et à perméabilité constante,
- Les pertes fer par hystérésis et courants de Foucault, l'effet de peau et les effets de dentures sont négligeables,
- L'effet des encoches est négligé.

L'ensemble de ces hypothèses permet ainsi de s'appuyer sur des propriétés telles que l'additivité des flux, la constance des inductances propres ou sur une loi de variation des inductances mutuelles entre le rotor et le stator de type sinusoïdale [6].

II.2.2 Modèle mathématique de la MAS

II.2.2.1 Equations électriques de la machine asynchrone

La machine asynchrone est constituée de deux circuits couplés électro-magnétiquement. Pour représenter le modèle d'une machine dans un repère triphasé, il faut écrire les équations

différentielles liant les tensions, les courants et les flux pour chaque enroulement du stator et du rotor [6].

Les équations des tensions régissant le fonctionnement d'une machine asynchrone s'écrivent sous forme matricielle [20] :

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

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} [I_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

$[V_s], [V_r]$: Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.

$[I_s], [I_r]$: Vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

$[\Phi_s], [\Phi_r]$: Vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

$[R_r], [R_s]$: Matrices des résistances statoriques et rotoriques.

Les flux totalisés Φ_s, Φ_r des phases statoriques et rotoriques s'expriment sous la forme :

$$[\Phi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (\text{II.5})$$

$$[\Phi_r] = [L_r][I_r] + [M_{sr}][I_s] \quad (\text{II.6})$$

L'isotropie et la symétrie de la machine font que les inductances propres des phases statoriques sont égales et de même pour celles du rotor. Les matrices $[L_s], [L_r]$ deviennent

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

L_s, L_r : Inductances propres statoriques et rotoriques.

M_r : inductance mutuelle entre deux phases du rotor.

M_s : Inductance mutuelle entre deux phases du stator.

La matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépend de la position angulaire θ entre l'axe du stator et celui du rotor :

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Où M_{sr} est l'inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor (leurs axes magnétiques sont alignés).

En introduisant les équations précédentes, nous obtenons le système d'équations électriques nécessaire à l'étude du fonctionnement de la machine à tous les régimes :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d\{[L_s] \cdot [I_s]\}}{dt} + \frac{\{d[M_{sr}] \cdot [I_r]\}}{dt} \quad (\text{II.7})$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d\{[L_r] \cdot [I_r]\}}{dt} + \frac{d\{[M_{rs}] \cdot [I_s]\}}{dt} \quad (\text{II.8})$$

II.2.2.2 Equations magnétiques

Les flux sont donnés par [21] :

$$[\phi_{abc}] = [L_{ss}][i_{abc}] + [L_{sr}][i_{abc}] \quad (\text{II.9})$$

$$[\phi_{abc}] = [L_{rr}][i_{abc}] + [L_{sr}][i_{abc}] \quad (\text{II.10})$$

Les matrices $[L_{ss}]$, $[L_{rr}]$ et $[M_{sr}]$ sont définies par :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix}$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T$$

II.2.2.3 Equations mécaniques de la machine

L'équation d'équilibre des couples s'écrit [20] :

$$C_{em} = C_{charge} \quad (\text{II.11})$$

Avec C_{em} le couple électromagnétique et C_{charge} le couple résistant extérieur. Si, pour une raison quelconque, cette égalité entre les couples est perturbée ($C_{em} \neq C_{charge}$), dans ce cas, l'équation d'équilibre des couples est réalisée grâce au couple dynamique :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{em} - C_{charge} \quad (\text{II.12})$$

J : Moment d'inertie des parties tournantes.

Ω_m : vitesse angulaire mécanique du rotor

$$(\Omega_m = p\omega)$$

Et ω : la pulsation mécanique, p : le nombre de paires de pôle

Les paramètres J et C_{charge} dépendent directement de la machine étudiée et de sa charge. Nous proposons ci-après un récapitulatif des équations électriques et mécaniques qui régissent le fonctionnement de la machine asynchrone à cage.

$$\left\{ \begin{array}{l} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \\ [\Phi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt} \\ [\Phi_r] = [L_r][I_r] + [M_{sr}][I_s] \\ J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{em} - C_{charge} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{II.14})$$

II.2.2.4 Choix du référentiel

Les équations de la machine peuvent être réécrites dans le repère d - q à condition de choisir le référentiel. Pour un référentiel immobile par rapport au stator, la convention utilisée est [21] :

$$- \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega \quad (\text{II.15})$$

D'autres référentiels peuvent être choisis :

- Référentiel lié au rotor avec :

$$- \frac{d\theta_s}{dt} = \omega \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \quad (\text{II.16})$$

- Référentiel lié au champ tournant avec :

$$- \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (\text{II.17})$$

II.2.2.5 Modèle de Park

Le modèle diphasé de la MAS s'effectue par une transformation du repère triphasé en un repère diphasé, qui n'est en fait qu'un changement de base sur les grandeurs physiques (tensions, flux, et courants), il conduit à des relations indépendantes de l'angle θ et à la réduction d'ordre des équations de la machine. La figure () met en relief l'axe direct d du référentiel de Park, et l'axe en quadrature d'indice q [5].

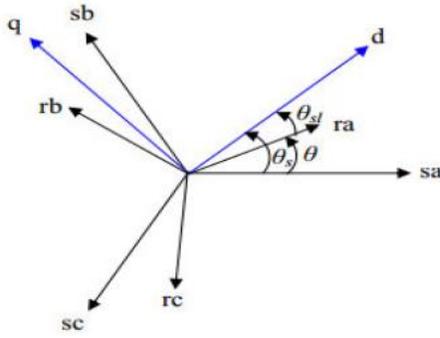


Figure II.1 : Position des axes d q par rapport aux axes de la machine [5].

Les équations statoriques se présentent comme suit :

$$\begin{aligned} [V_{sabc}] &= [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\phi_{sabc}] \\ [\phi_{sabc}] &= [L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \end{aligned} \quad (\text{II.18})$$

L'utilisation de la matrice $P(\theta)$ dans les équations de la machine asynchrone nous donnera le développement suivant :

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = [P(\theta_s)][V_{sodq}] \\ [i_{sabc}] = [P(\theta_s)][i_{sodq}] \\ [\phi_{sabc}] = [P(\theta_s)][\phi_{sodq}] \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Après calcul nous aurons :

$$[V_{sodq}] = [P(\theta_s)]^{-1}[R_s][P(\theta_s)][i_{sodq}] + [P(\theta_s)]^{-1} \frac{d[P(\theta_s)][\phi_{sodq}]}{dt} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$$[P(\theta_s)]^{-1}[R_s][P(\theta_s)] = [R_s] \quad (\text{II.21})$$

$$[P(\theta_s)]^{-1} \frac{d[P(\theta_s)][\phi_{sodq}]}{dt} = \frac{d[\phi_{sodq}]}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} [\phi_{sodq}] \quad (\text{II.22})$$

Ainsi de manière globale et en prenant le composant homopolaire nul nous aurons le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} + \omega_s \Phi_{sd} \\ 0 = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - \omega_r \Phi_{rq} \\ 0 = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} + \omega_r \Phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Avec : $\omega_s = \frac{d}{dt} \theta_s$ $\omega_r = \frac{d}{dt} \theta_r$

II.2.2.5.1 Equations du flux

La transformation des flux nous donnera [5] :

$$[\Phi_{sodq}] = \begin{pmatrix} L_{so} & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{pmatrix} [i_{sodq}] + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & M \end{pmatrix} [i_{rodq}] \quad (\text{II.24})$$

Les mêmes développements seront repris au niveau des équations rotoriques.

Avec $L_s = I_s - m_s$ et $L_r = I_r - m_r$: sont les inductances cycliques propres du stator et du rotor respectivement.

$L_{so} = l_s + 2m_s$: L'inductance cyclique homopolaire du stator.

$M = \frac{3}{2} m_{sr}$: L'inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor.

Ainsi de manière globale et en prenant le composant homopolaire nul nous aurons le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

II.3 Modélisation du défaut statorique de type court-circuit

Les équations de tension et de flux de la bobine B_{cc} exprimées dans le repère biphasé d'axe α et β lié au stator sont les suivantes [6]:

$$\begin{cases} 0 = \mu_{cc} \cdot R_s \cdot i_{cc} + \frac{d\phi_{cc}}{dt} \\ \phi_{cc} = \mu_{cc}^2 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot L_m + L_f\right) \cdot i_{cc} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot L_m [\cos(\theta_{cc}) \sin(\theta_{cc})] (\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r}) \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

L_m et L_f : inductance magnétisante et inductance de fuite.

$$\mu_{cc} = \frac{\eta_{cc}}{N_s} = \frac{\text{Nombre de spires en court-circuit}}{\text{Nombre de spires sur une phase saine}} \quad (\text{II.27})$$

θ_{cc} et θ angle du bobinage en court-circuit et angle mécanique, respectivement.

R_s : Résistance propre d'une phase statorique.

Le courant i_{cc} dans le bobinage en défaut est à l'origine du champ magnétique stationnaire par rapport au stator, dirigé selon l'axe θ_{cc} . Ce champ magnétique est à l'origine du flux ϕ_{cc} .

En projetant i_{cc} et ϕ_{cc} sur les axes α et β , on leur associe les vecteurs stationnaires :

$$\underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc}) \\ \sin(\theta_{cc}) \end{bmatrix} \cdot i_{cc} \quad \text{et} \quad \underline{\phi}_{\alpha\beta_{cc}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc}) \\ \sin(\theta_{cc}) \end{bmatrix} \cdot \phi_{cc}$$

Les relations de l'équation (II.26) deviennent des relations entre des vecteurs stationnaires par rapport au stator. Ainsi, le modèle global de la machine asynchrone en défaut de court-circuit s'écrit :

➤ Pour le stator :

$$\begin{cases} \underline{u}_{\alpha\beta_s} = R_s \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_s} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{\alpha\beta_s} \\ \underline{\phi}_{\alpha\beta_s} = L_f \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_s} + L_m \cdot \left(\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} \right) \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

➤ Pour le rotor :

$$\begin{cases} \underline{u}_{\alpha\beta_r} = 0 = R_r \underline{i}_{\alpha\beta_r} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{\alpha\beta_r} - \omega \cdot P \left(\frac{\pi}{2} \right) \underline{\phi}_{\alpha\beta_r} \\ \underline{\phi}_{\alpha\beta_r} = L_m \cdot \left(\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} \right) \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

➤ Et pour le bobinage en défaut :

$$\begin{cases} 0 = \mu_{cc} \cdot R_s \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{\alpha\beta_{cc}} \\ \underline{\phi}_{\alpha\beta_{cc}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot Q(\theta_{cc}) \cdot \left[L_m \cdot \left(\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} \right) + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} \right] \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Avec

$\underline{u}_{\alpha\beta_s}$ et $\underline{u}_{\alpha\beta_r}$: tensions statoriques et rotoriques sur les deux axes α et β .

R_r est la résistance propre d'une phase rotorique et ω_m la pulsation mécanique.

$$Q(\theta_{cc}) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc})^2 & \cos(\theta_{cc}) \cdot \sin(\theta_{cc}) \\ \cos(\theta_{cc}) \cdot \sin(\theta_{cc}) & \sin(\theta_{cc})^2 \end{bmatrix}$$

Par analogie avec le schéma équivalent ramenée au primaire des transformateurs et en négligeant le terme en L_f devant L_m dans l'expression du flux de court-circuit (équation (II.30)), les équations de flux de la machine asynchrone en défaut statorique deviennent :

$$\begin{cases} \underline{\phi}_{\alpha\beta_s} = \underline{\phi}_{\alpha\beta_f} + \underline{\phi}_{\alpha\beta_m} = L_f \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_s} + L_m \cdot (\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r} - \tilde{\underline{i}}_{\alpha\beta_{cc}}) \\ \underline{\phi}_{\alpha\beta_r} = \underline{\phi}_{\alpha\beta_m} = L_m \cdot (\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r} - \tilde{\underline{i}}_{\alpha\beta_{cc}}) \\ \tilde{\underline{\phi}}_{\alpha\beta_0} \approx \mu_{cc} \cdot Q(\theta_{cc}) \cdot \underline{\phi}_{\alpha\beta_m} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

Avec

$$\tilde{\underline{i}}_{\alpha\beta_{cc}} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} \quad \text{et} \quad \tilde{\underline{\phi}}_{\alpha\beta_{cc}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot \underline{\phi}_{\alpha\beta_{cc}}$$

$\underline{\phi}_{\alpha\beta_f}$ et $\underline{\phi}_{\alpha\beta_m}$: flux magnétisant et flux de fuite statorique.

Ainsi, l'équation de courant du bobinage en défaut ramenée au primaire s'écrit :

$$\tilde{\underline{i}}_{\alpha\beta_{cc}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\mu_{cc}}{R_s} \cdot Q(\theta_{cc}) \cdot \frac{d\underline{\phi}_{\alpha\beta_m}}{dt} \quad (\text{II.32})$$

D'après cette équation, la bobine en défaut se ramène à un simple quadripôle résistif, non équilibré, mis en parallèle avec l'inductance magnétisante.

L'existence de la matrice $Q(\theta_{cc})$ fait que la représentation d'état dans le repère du stator reste complexe. En négligeant les chutes de tension dues à R_s et L_f devant les tensions d'entrée $\underline{u}_{\alpha\beta_s}$,

on peut approcher les tensions aux bornes du quadripôle de court-circuit par les tensions statoriques.

Les courants de ligne sont alors la somme des courants dus au court-circuit et des courants consommés par le modèle classique de Park. Ainsi, il devient possible d'exprimer simplement l'équation du bobinage en défaut dans le repère statorique :

$$\tilde{i}_{\alpha\beta_{cc}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\mu_{cc}}{R_s} \cdot Q(\theta_{cc}) \cdot \underline{u}_{\alpha\beta_s} \quad (\text{II.33})$$

La figure II.2 représente le schéma équivalent de la machine asynchrone en régime dynamique à fuites totalisées au stator, tenant compte du défaut de court-circuit.

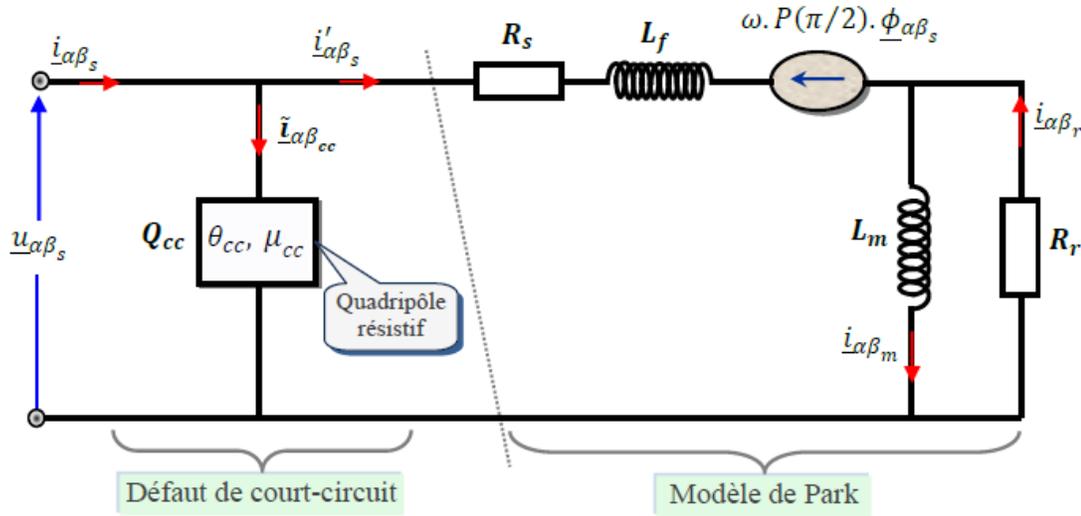


Figure II.2 : Modèle de court-circuit dans le repère lié au stator [6].

II.3.1 Représentation d'état du modèle de défaut

Le modèle d'état de la machine asynchrone s'écrit [21] :

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}} &= f(\underline{x}) + g \cdot \underline{u} \\ \underline{y} &= h(\underline{x}) + H(\underline{x}) \cdot \underline{u} \end{aligned} \quad (\text{II. 34})$$

$$\underline{x} = [i'_{d_3} \quad i'_{q_s} \quad \phi_{d_r} \quad \phi_{q_r} \quad \theta]^T, \underline{u} = [U_{d_2} \quad U_{q_s}]^T \text{ et } \underline{y} = [i_{d_s} \quad i_{q_s} \quad \omega]^T$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} -v \cdot i'_{ds} + \omega_s \cdot i'_{qs} + \frac{k}{T_r} \cdot \phi_{dr} + k \cdot \phi_{qr} \cdot \omega_r \\ -\omega_s \cdot i'_{ds} - v \cdot i'_{qs} - k \cdot \omega_r \cdot \phi_{dr} + \frac{k}{T_r} \cdot \phi_{dr} \\ \frac{M}{T_r} \cdot i'_{ds} - \frac{1}{T_r} \cdot \phi_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \phi_{qr} \\ \frac{M}{T_r} \cdot i'_{qs} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \phi_{dr} - \frac{1}{T_r} \cdot \phi_{qr} \\ \frac{P^2 \cdot M}{J \cdot L_r} \cdot (\phi_{dr} \cdot i'_{qs} - \phi_{qr} \cdot i'_{ds}) - \frac{f}{J} \cdot \omega_r - \frac{P}{J} \cdot C_r \\ \omega_r \end{bmatrix}$$

$$h(x) = \begin{bmatrix} i'_{d_2} \\ i'_{q_s} \\ \omega \end{bmatrix}, \quad H(x) = \begin{bmatrix} \frac{2}{3R_s} \sum_k^3 \eta_{\alpha_k} P(-\theta) Q_{\alpha_k} P(\theta) & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{0} \end{bmatrix}$$

II.3.2 Résultats de simulation de défaut de court-circuit statorique :

II.3.2.A. Démarrage à vide de la machine asynchrone triphasée

Défaut dans la phase (A) 6% et 12% à vide

Défaut de 6% à vide ($\eta_{CCA} = 6\%$):

Le courant de démarrage atteint (15 A) puis il est stabilisé à la valeur nominale.

A l'instant de temps (2 s), on applique le défaut $\eta_{CCA} = (6\%)$. On note que le pic de courant atteint (3.2A) puis diminue à la valeur (2.6 A).

Les autres grandeurs comme la vitesse de rotation qui arrive au synchronisme (1485 tr/min) avant le défaut, et à l'instant d'application le défaut cette dernière dépasse (1500 tr/min)

La même chose par rapport le flux qui prend une valeur de (1.2 Wb) à l'instant ($t= 0.6$ s) est après ça (présence de défaut) on observe une augmentation de sa valeur jusqu'à (1.23 W b).

Et aussi le défaut qui affecté sur le couple électromagnétique dont dépasse ce dernier (10 N.m) puis est diminué à (4. 45N.m).

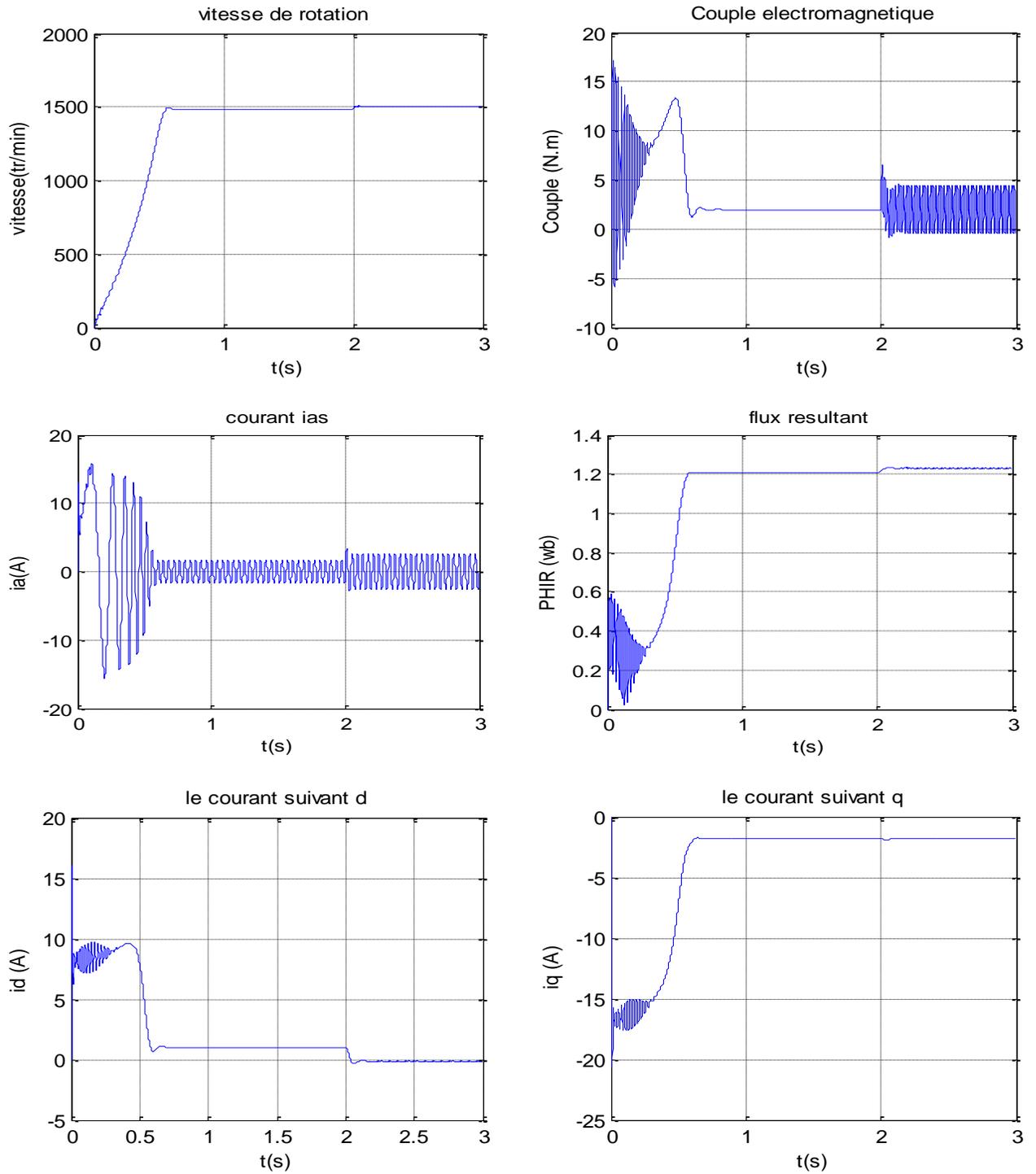


Figure II.3 : fonctionnement à vide avec application le défaut (6%) à l'instant $t=2$ s

Défaut de 12% à vide ($\eta_{CCA} = 12\%$):

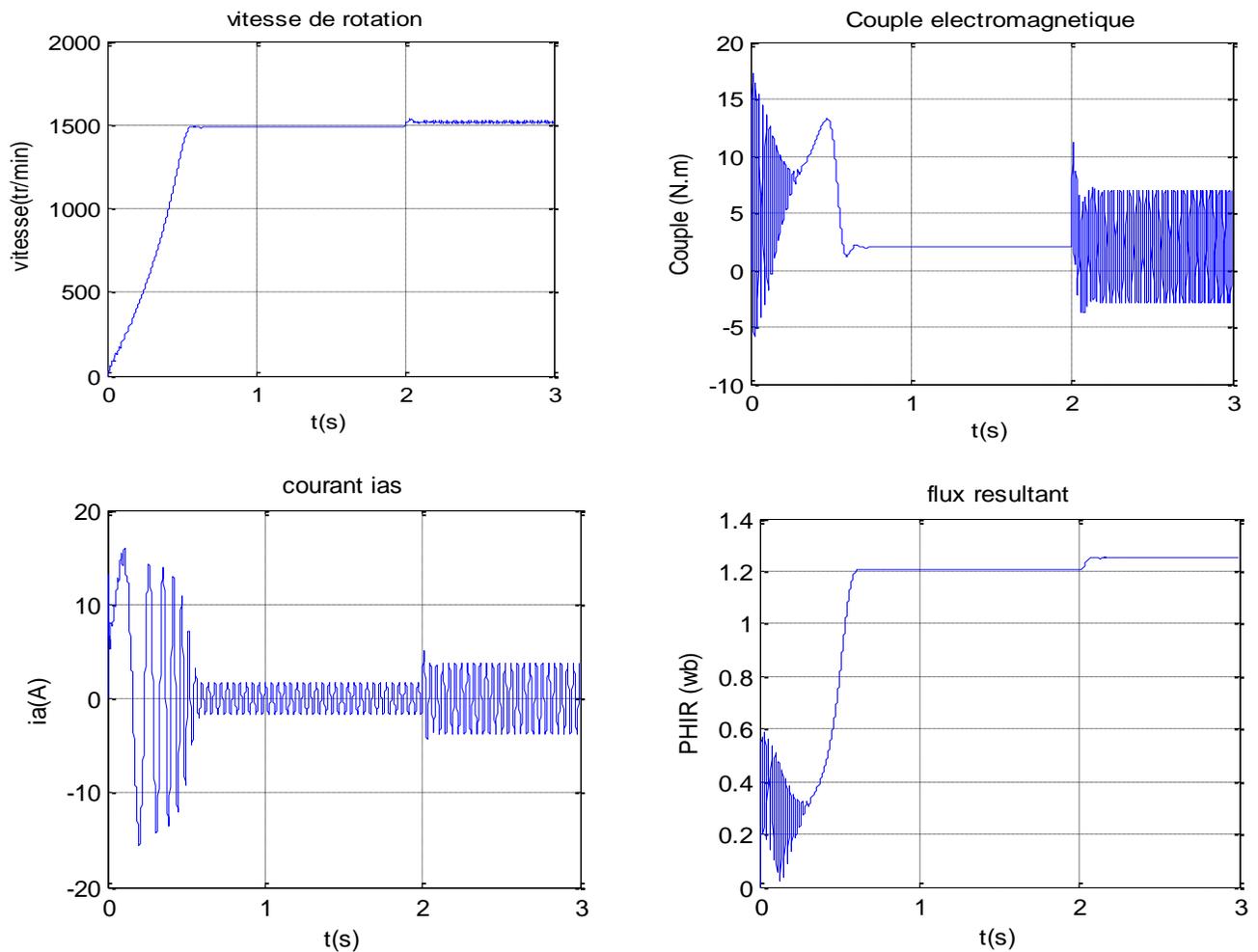
Le courant de démarrage atteint (16 A) puis est stabilisé à la valeur nominale.

A l'instant de (2 s), l'application de défaut $\eta_{CCA} = (6\%)$ on note que le pic de courant atteint (5A) puis diminue à la valeur (3.7 A).

Les autres grandeurs comme la vitesse de rotation qui arrive au synchronisme (1485 tr/min) avant le défaut, et à l'instant d'application le défaut cette dernière dépasse (1500 tr/min)

La même chose par rapport le flux qui prend une valeur de (1.2 Wb) à l'instant ($t= 0.6$ s) est après ça (présence de défaut) on observe une augmentation de son valeur jusqu'à (1.25 W b).

Et aussi le défaut qui affecté sur le couple électromagnétique dont dépasse ce dernier (10 N.m) puis est diminué à (7N.m).



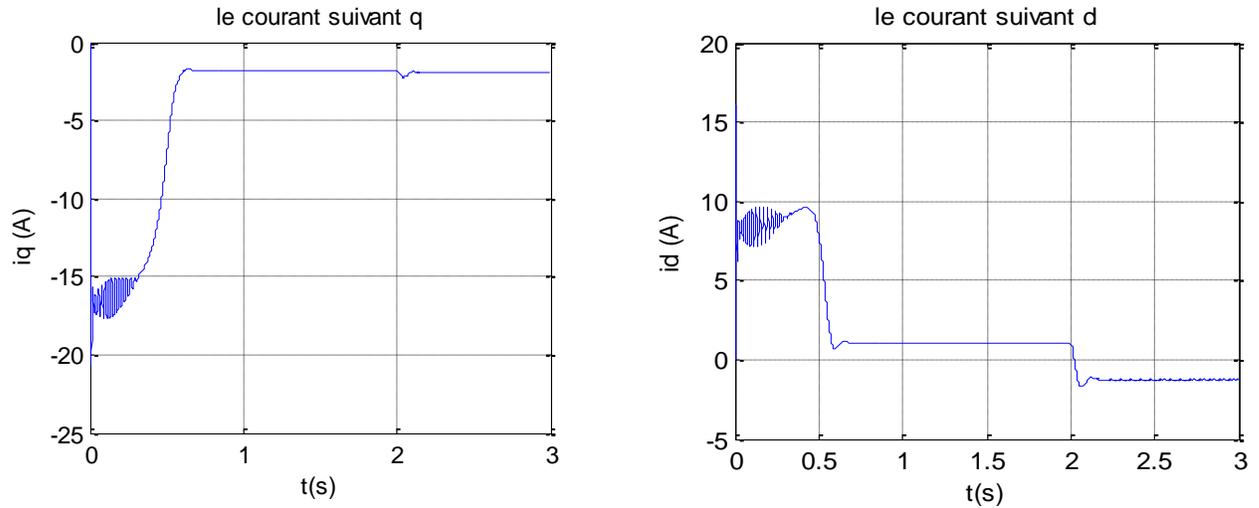


Figure II.4 : fonctionnement à vide avec application le défaut (12%) à l'instant $t=2s$.

II.3.2.B Application d'une charge en régime permanent

Défaut dans la phase (A) 6% et 12% en charge

Défaut de 6% en charge ($\eta_{ccA} = 6\%$):

A l'instant ($t=1s$), l'instant d'application de la charge ($C_r = 10Nm$), on observe une augmentation de courant statorique dans les trois phases .et à l'instant ($t=2s$), l'instant d'application de défaut($\eta_{ccA} = 6\%$)on remarque que le pic de courant atteint (7.8A) puis diminue à la valeur (7 A).

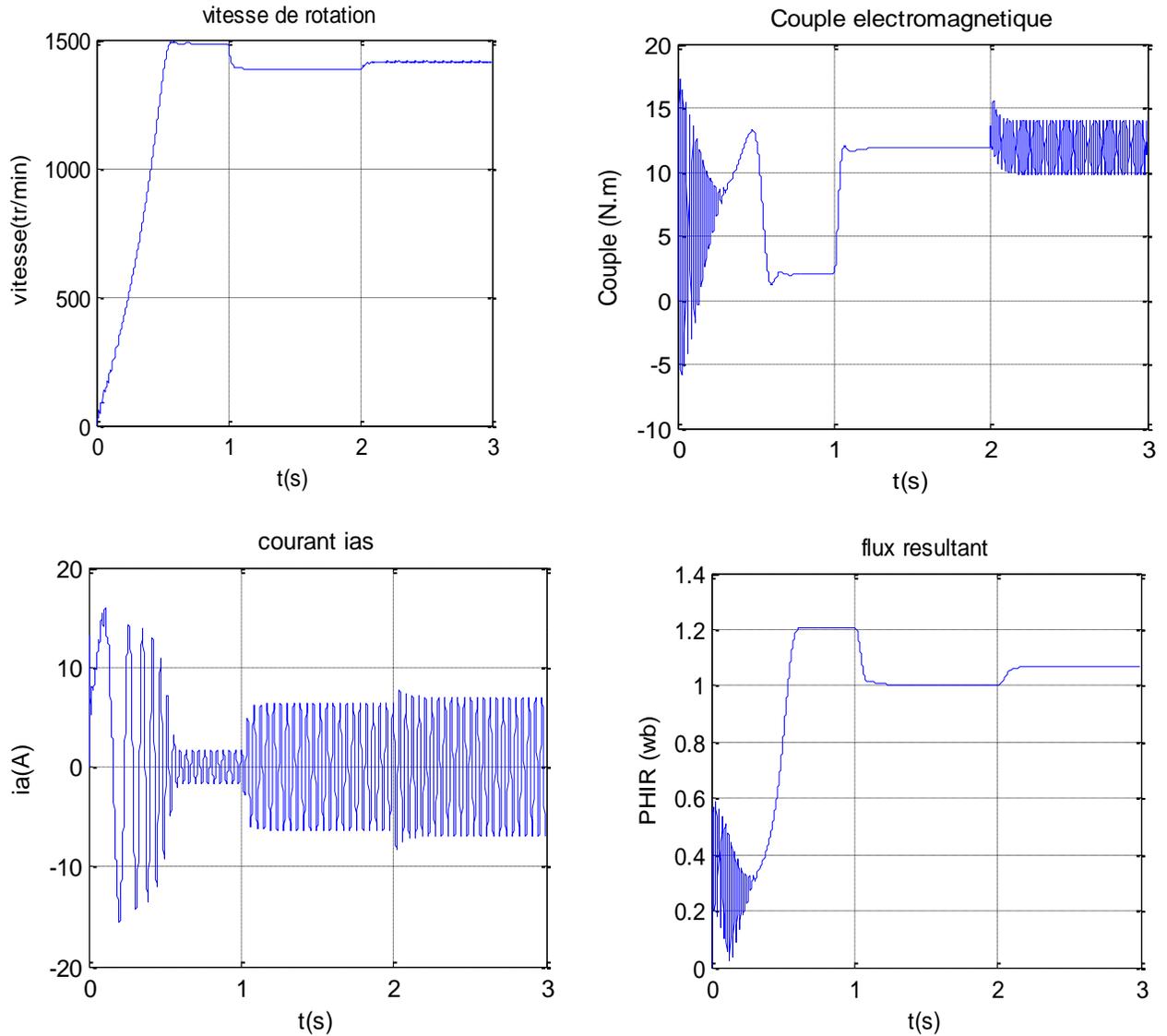
Accroissement de la vitesse à l'instant de démarrage est presque linéaire La vitesse se stabilise à la valeur (1485tr/min), puisque le moteur possède deux paires de pôles.

Une légère diminution de vitesse à l'instant d'application de la charge est observée (1383tr/min). Mais à l'instant d'application de défaut la vitesse est augmenté à plus de (1416tr/min). A cause de l'augmentation du courant.

Après le régime de démarrage, le flux prend une valeur de (1.2Wb) environ. A l'instant d'application de la charge, on observe une légère diminution du flux (1.1 Wb) et stabilise au (1Wb). Cette dernière (la diminution du flux) est causée par la chute de tension ohmique importante en charge, autrement dit,

il existe une diminution de la tension nécessaire à la magnétisation de la machine et à partir de l'instant d'application de défaut ($\eta_{CCA} = 6\%$) le flux qui augmente jusqu'à (1.06 Wb).

Au premier instant du démarrage, le couple électromagnétique est augmenté (moment d'inertie). Ce couple atteint la valeur (13 N.m). Si on charge la machine, le couple électromagnétique tend vers la valeur nominale au régime établi. et à l'instant de court-circuit (le défaut) le pic de couple dépasse (15.5 N.m) puis est stabilisé à la valeur de (14 N.m).



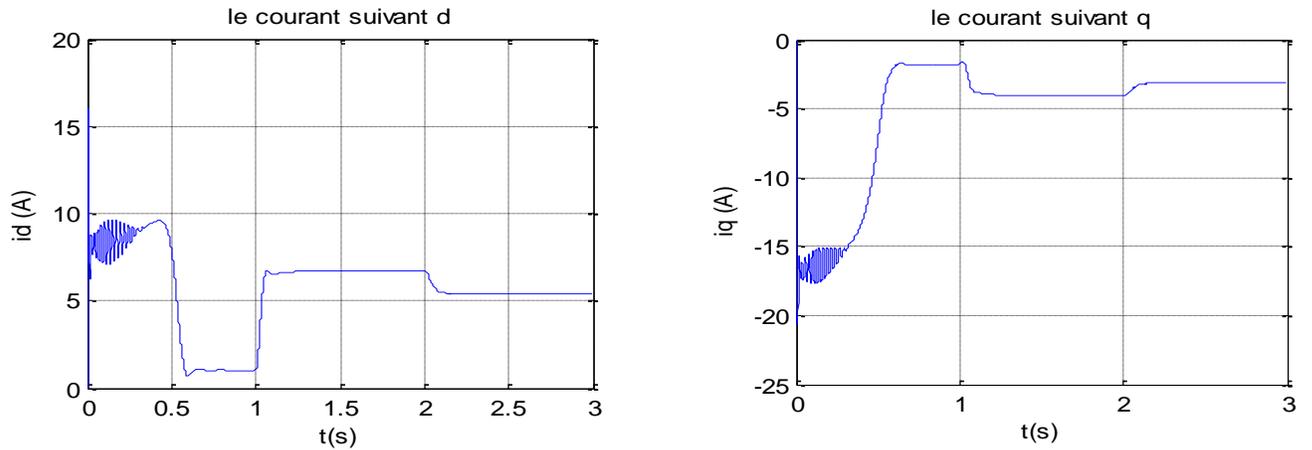
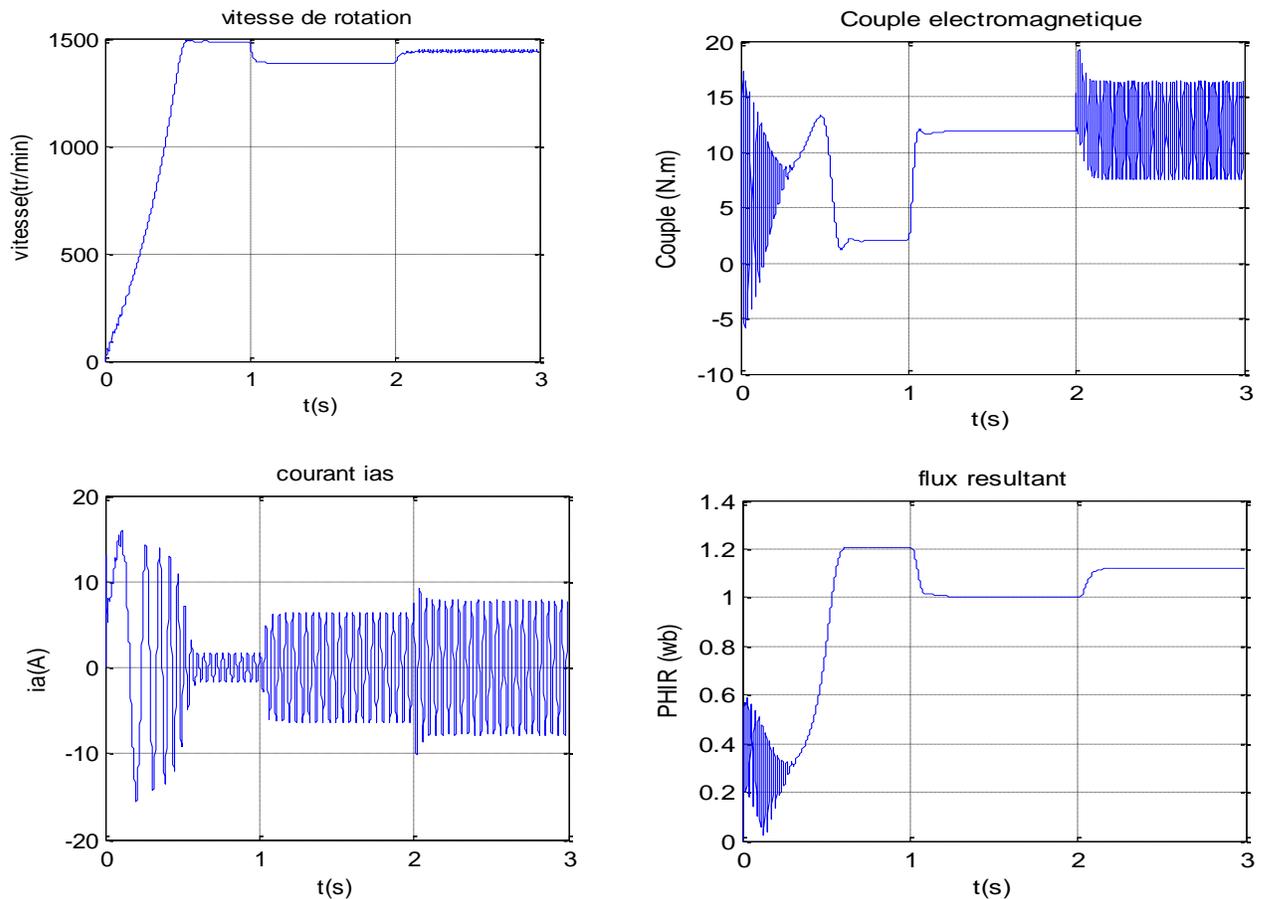


Figure II.5 : fonctionnement en charge ($C_r = 10\text{N.m}$ à l'instant $t = 1\text{s}$) avec application le défaut (6%) à l'instant $t = 2\text{s}$.

Défaut de 12% en charge ($\eta_{cca} = 12\%$):

Presque le même cas précédent, mais à l'instant ($t = 2\text{s}$) on remarque une augmentation plus important dans les grandeurs précédentes à cause du défaut qui élevé jusqu'à 12%.



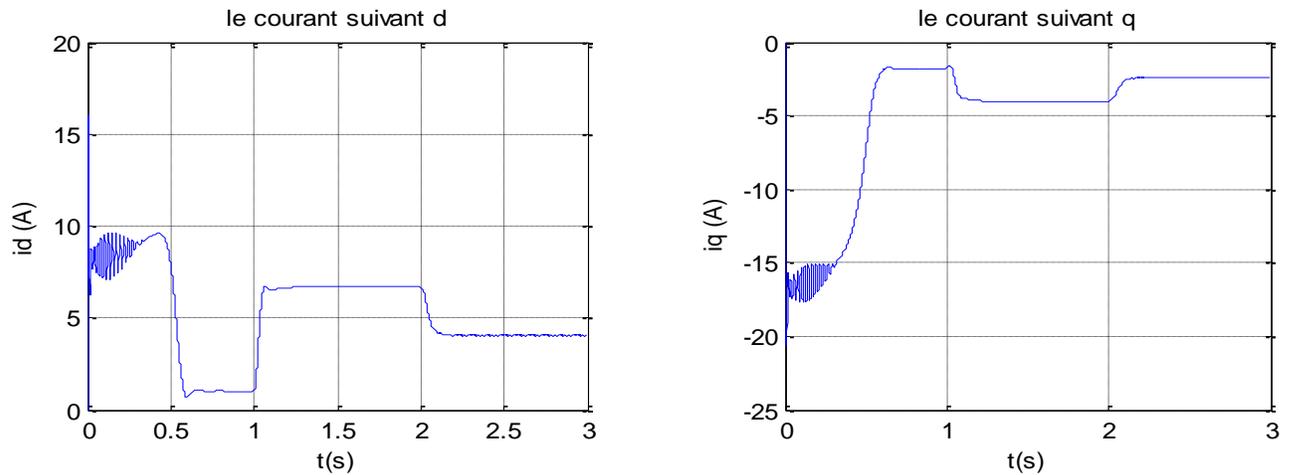


Figure II.6 : fonctionnement en charge ($C_r = 10\text{N.m}$ à l'instant $t = 1\text{s}$) avec application le défaut (12%) à l'instant $t = 2\text{s}$.

II.3.2.C Scénario d'absence de la phase (A)

A vide :

Le courant de démarrage atteint (24 A) puis est stabilisé à la valeur nominale(2.4A).

A l'instant de (2 s), l'application de l'absence de la phase (A) on note que le pic de courant atteint (8.7A) puis diminue à la valeur (7.7 A).

Les autres grandeurs comme la vitesse de rotation qui arrive au synchronisme (1491 tr/min) avant le défaut, et à l'instant d'application l'absence de la phase (A) cette dernière diminuée a (1500 tr/min)

La même chose par rapport le flux qui prend une valeur de (1.3 Wb) à l'instant ($t = 0.4$ s) est après ça (l'absence de la phase(A)) on observe une diminution de son valeur jusqu'à (0.8 W b).

Et aussi le défaut qui affecté sur le couple électromagnétique dont dépasse ce dernier (10 N.m) puis est diminué à (10N.m).

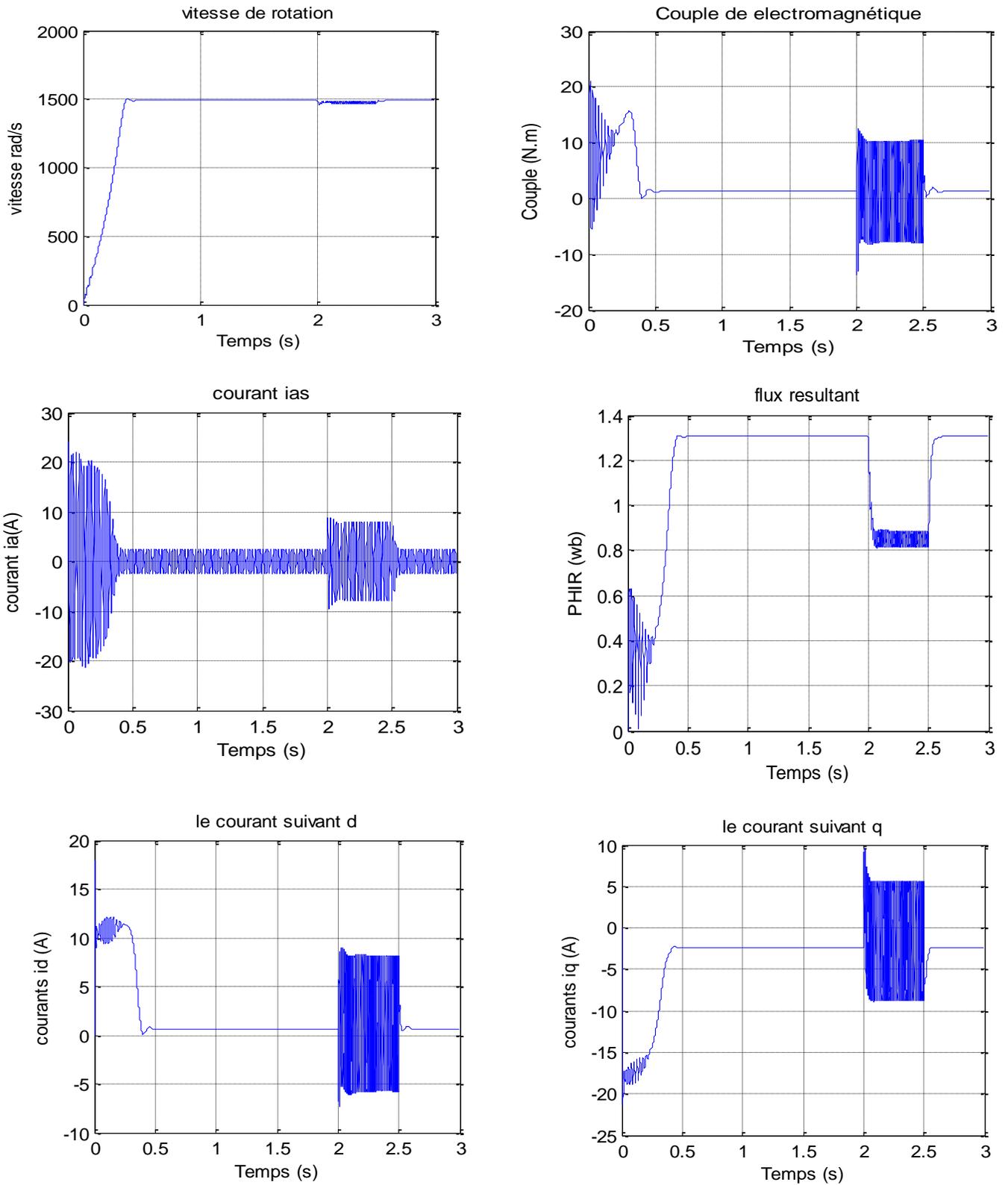


Figure II.7 : fonctionnement à vide avec l'absence de la phase (A) a l'instant t=2s

En charge :

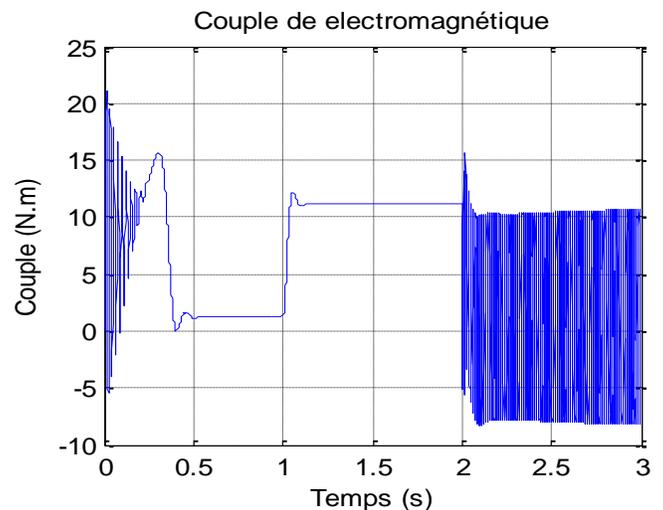
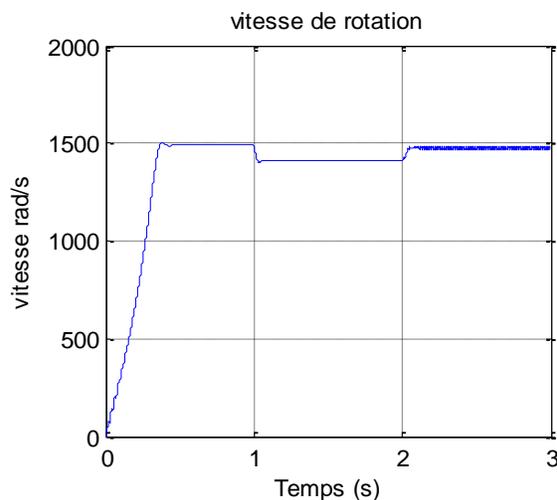
Après l'instant ($t=1s$), l'instant d'application de la charge ($C_r = 10Nm$), on observe une augmentation de courant statorique dans les trois phases (6.5A). et à l'instant ($t=2s$), l'instant d'application de l'absence de la phase(A) on remarque que le pic de courant atteint (10.5A) puis diminue à la valeur (8 A).

Accroissement de la vitesse à l'instant de démarrage est presque linéaire La vitesse se stabilise à la valeur (1491tr/min), puisque le moteur possède deux paires de pôles.

Une légère diminution de vitesse à l'instant d'application de la charge est observée (1410tr/min). Mais à l'instant d'application de l'absence de la phase(A) la vitesse est augmentée à plus de (1480tr/min). A cause de l'augmentation du courant.

Après le régime de démarrage, le flux prend une valeur de (1.3Wb) environ. A l'instant et après d'application de la charge, on observe une légère diminution du flux (1.15 Wb) et. Cette dernière (la diminution du flux) est causée par la chute de tension ohmique importante en charge, autrement dit, il existe une diminution de la tension nécessaire à la magnétisation de la machine et à partir de l'instant d'application l'absence de phase(A) le flux qui diminue jusqu'à (0.8 Wb).

Au premier instant du démarrage, le couple électromagnétique est augmenté (moment d'inertie). Ce couple atteint la valeur (16 N.m). Si on charge la machine, le couple électromagnétique tend vers la valeur nominale au régime établi. et à l'instant de l'absence de la phase (A) le pic de couple dépasse (15 N.m) puis est stabilisé à la valeur de (10 N.m) ceci sous-entend d'intenses vibrations mécaniques.



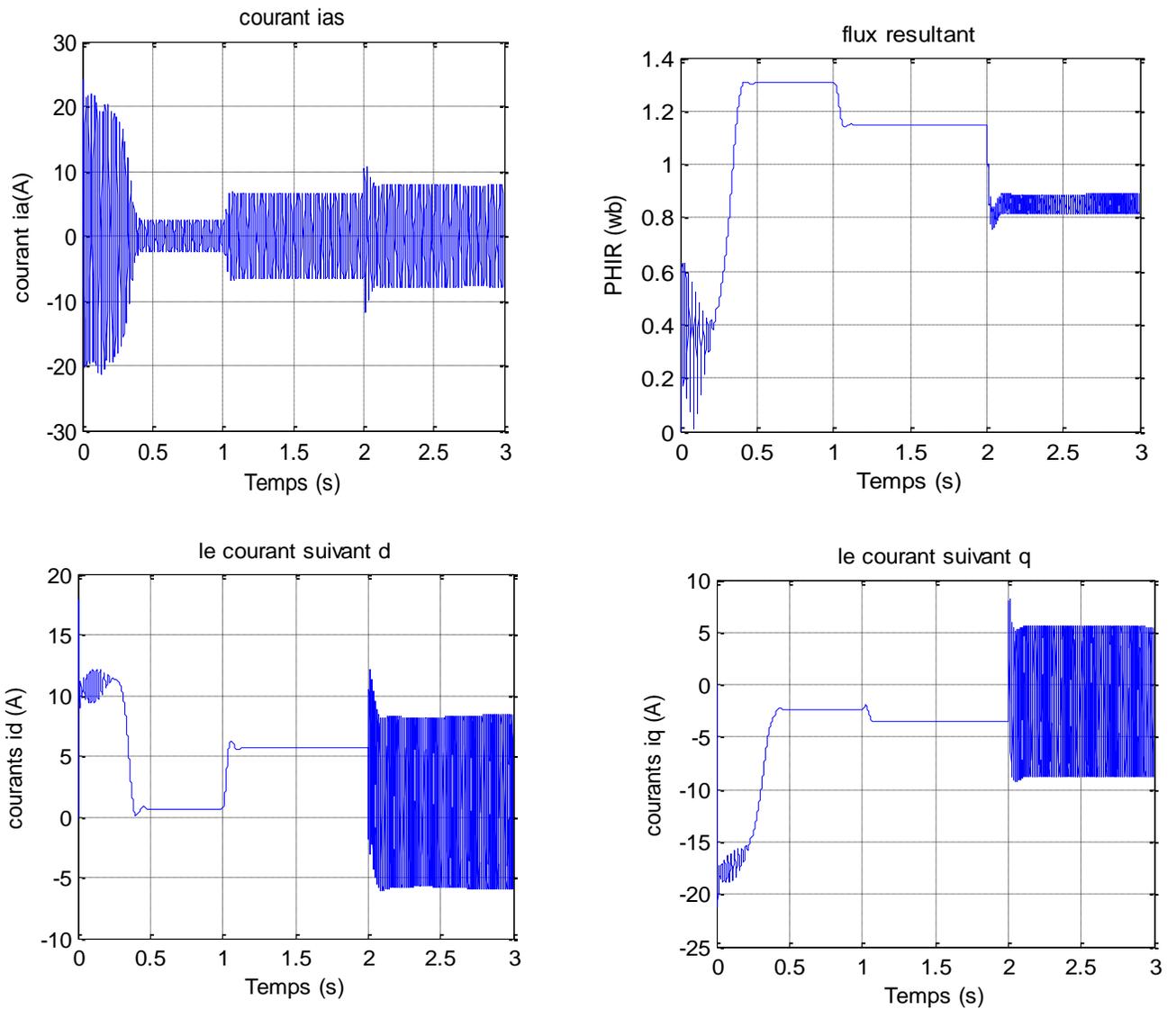


Figure II.8 : fonctionnement en charge ($C_r = 10\text{N.m}$ à l'instant $t = 1\text{s}$) avec l'absence de la phase (A) à l'instant $t=2\text{s}$

II.4. Modélisation du défaut rotorique du type rupture de barres

Comme dans le cas du court-circuit des spires d'une phase du stator, les deux paramètres repérant le défaut de cassure de barre, et dont le modèle est supposé équivalent à un système triphasé bobiné au rotor, sont θ_0 et η_0 , où θ_0 est l'angle électrique repérant le bobinage en défaut ou

plus exactement la barre en défaut, et η_0 est le rapport de défaut permettant de quantifier le déséquilibre et d'obtenir le nombre de barres cassées n_{bc} exprimé sur une phase fictive par [8] :

$$\eta_0 = \frac{3n_{bc}}{n_b} \quad (II.35)$$

Les équations de tension et de flux de la bobine en défaut B_0 exprimées dans le repère biphasé d'axe d et q lié au rotor sont les suivantes [6] :

$$\begin{cases} 0 = \eta_0 \cdot R_r \cdot i_0 + \frac{d\phi_0}{dt} \\ \phi_0 = \frac{2}{3}\eta_0^2 \cdot L_r \cdot i_0 + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \eta_0 \cdot L_r \cdot [\cos(\theta_0)\sin(\theta_0)] \cdot (\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r}) \end{cases} \quad (II.36)$$

θ_0 : angle repérant le défaut.

L'expression de la matrice équivalente :

$$R_{eq} = R_r + R_{d\acute{e}f} = R_r - \frac{\alpha}{1+\alpha} \cdot Q(\theta_0) \cdot R_r \quad (II.37)$$

Avec : $\alpha = \frac{2}{3} \cdot \eta_0$

Ainsi on obtient un schéma équivalent avec la mise en série de la résistance R_r et de la matrice de défaut $R_{d\acute{e}f}$.

La figure II.9 illustre le schéma équivalent de la machine asynchrone avec un défaut rotorique en régime dynamique avec fuites ramenées au stator, dans le repère rotorique.

La rupture de barre au rotor se ramène à un simple quadripôle résistif $R_{d\acute{e}f}$ mis en série avec la résistance rotorique.

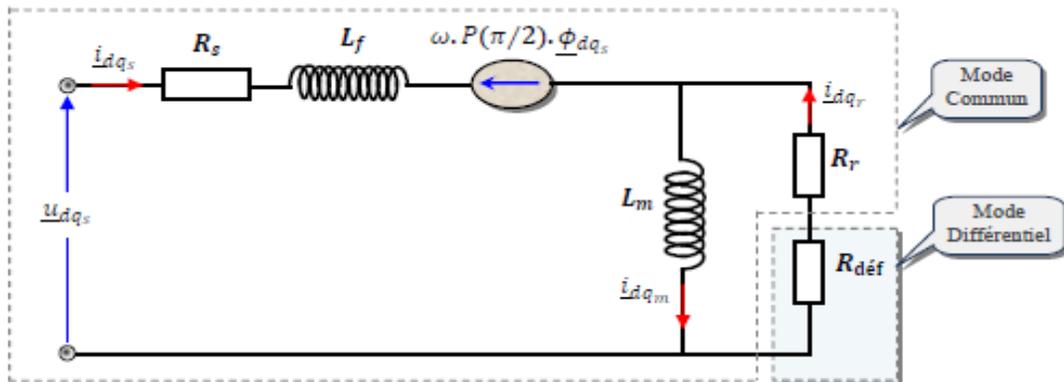


Figure II.9 : Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone.

La distinction entre les résistances R_r saine et de défaut $R_{\text{déf}}$ se fait à travers :

$$R_r = R_r \cdot I_2 = R_{r*} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Et

$$R_{\text{déf}} = -\frac{\alpha}{1+\alpha} \cdot R_r \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_0)^2 & \cos(\theta_0) \cdot \sin(\theta_0) \\ \cos(\theta_0) \cdot \sin(\theta_0) & \sin(\theta_0)^2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

On remarque que la résistance de défaut, au contraire de la résistance saine, possède des termes de couplage.

Si la machine est saine ($\alpha = 0$), ce qui correspond à $R_{\text{déf}}$ nulle, ce qui revient à court-circuiter le quadripôle de défaut, le schéma équivalent correspond donc à celui du modèle classique de Park lié au rotor.

Lorsque le paramètre α est non nul, la résistance $R_{\text{déf}}$ introduit un déséquilibre dans les grandeurs rotoriques ainsi que des termes de couplage sur les axes d et q du rotor. Par conséquent, de nouvelles composantes dont la pulsation est proportionnelle au glissement de la machine sont introduites, et se retrouvent de ce fait dans les courants statoriques, traduisant ainsi un déséquilibre rotorique.

L'angle θ_0 permet d'effectuer un repérage absolu du bobinage en défaut par rapport à l'axe d.

En effet, les courants réels induits dans les encoches rotoriques étant N_p phasés, l'angle θ_0 est donc fixé par la position initiale du rotor par rapport au stator. Pour localiser une barre cassée, il faut donc imposer au rotor une référence qui permet de repérer les barres selon l'angle θ_0 : il suffit pour cela d'effectuer la mesure de la position du rotor grâce à un capteur de position.

L'ensemble des équations électriques de la machine asynchrone en défaut rotorique, dans un référentiel lié au rotor, s'écrit :

$$\begin{cases} \underline{u}_{dq_s} = R_s \cdot \underline{i}_{dq_s} + \frac{d}{dt} \underline{\varphi}_{dq_s} + \omega \cdot P \left(\frac{\pi}{2} \right) \cdot \underline{\phi}_d dq_s \\ \underline{\Phi}_{dq_s} = (L_f + L_m) \cdot \underline{i}_{dq_s} + L_m \cdot \underline{i}_{dq_r} \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot \underline{i}_{dq_r} + \frac{d}{dt} \underline{\Phi}_{dq_r} \\ \underline{\phi}_{dq_r} = L_m \cdot (\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r}) \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

$$\begin{cases} R_{eq} = R_r \cdot I_2 + R_{\text{déf}} \\ R_{\text{déf}} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot Q(\theta_0) \cdot R_r \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique de la machine asynchrone tout en mettant l'accent sur le problème des défauts de court-circuit et de rupture de barre. Les simulations correspondantes sont effectuées et ce pour nous permettre de comprendre les différents phénomènes physiques mis en jeu au niveau de la machine.

Chapitre III :
Pronostic des défauts
de roulements dans
une machine
asynchrone

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'application de méthodes prédictives pour surveiller la dégradation des roulements dans les moteurs asynchrones à cage. L'objectif est d'estimer la durée de vie restante (RUL) après la détection d'un défaut. Les indicateurs de défaut sont étudiés à l'aide de la base de données de test, et ces paramètres sont calculés à partir de l'analyse temporelle et fréquentielle des signaux vibratoires.

III.2 Présentation du banc expérimental

Pour cette étude, les données de test de fonctionnement du Centre pour les systèmes de maintenance intelligents de l'Université de Cincinnati ont été utilisées. Les données sont accessibles au public dans le référentiel de données des pronostics AMES de la NASA. Le schéma de principe du banc de test expérimental utilisé pour collecter ces données est représenté dans la Figure (III.1). Ce banc de test permet d'effectuer trois tests de fonctionnement avec défaut. Dans chaque test, quatre roulements Rexnord ZA-2115 à double rangée sont utilisés. Ces quatre roulements sont installés sur un arbre qui tourne à une vitesse constante de 2000 tr/mn. L'arbre est entraîné par un moteur à courant alternatif couplé à l'arbre par des courroies. Les roulements sont lubrifiés à force et chargés radialement avec une force de 6000 [lb] à travers un mécanisme à ressort. Les vibrations de chacun des quatre paliers sont mesurées à l'aide d'accéléromètres piézoélectriques (ICP) à circuit intégré à quartz de haute sensibilité. Les données sont collectées à l'aide d'une carte d'acquisition de données National Instruments 6062E (NI-DAQ) à une fréquence d'échantillonnage de 20 KHz [30].



Carte d'acquisition (NI-DAQ-6062)



roulements Rexnord ZA-2115

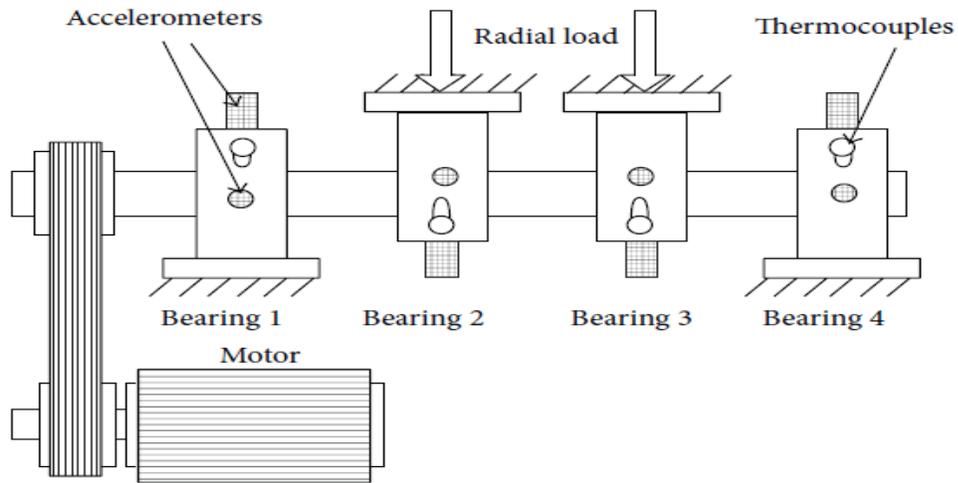
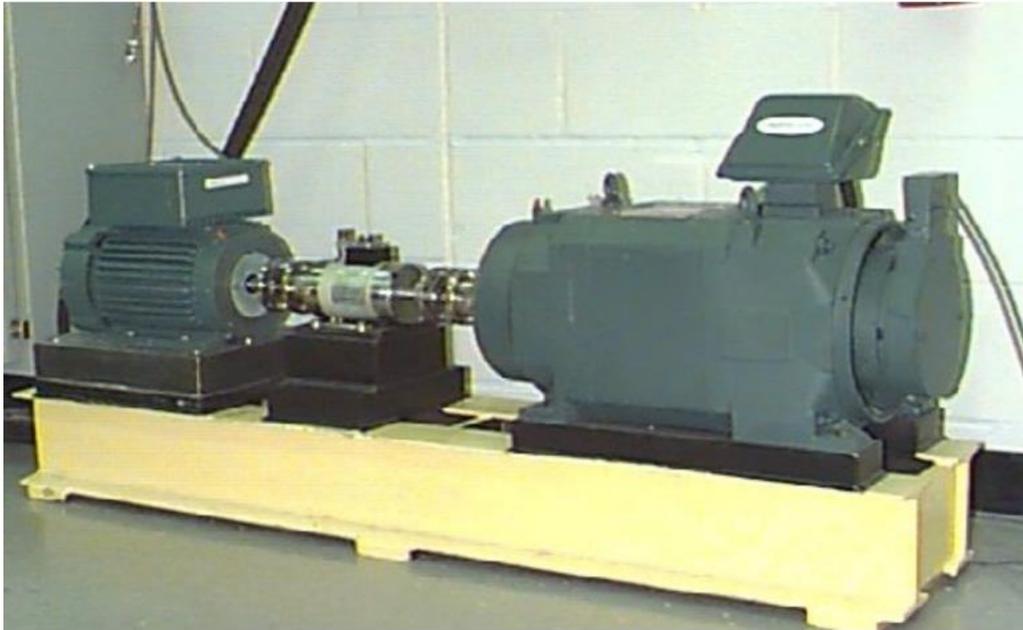


Figure III.1 : Banc d'essai expérimental.

III.2.1 Premier test

- Une charge radiale de 6 000 lb est appliquée à l'arbre et aux roulements par l'intermédiaire d'un mécanisme à ressort, et la vitesse de rotation est maintenue constante à 2 000 tr/min. Des bouchons magnétiques installés dans la conduite de retour d'huile recueillent les

débris de l'huile comme preuve de la dégradation des roulements. Accéléromètre ICP à quartz haute sensibilité PCB 353B33 monté sur l'axe X horizontal et l'axe Y vertical chaque roulement.

- Les données de vibration sont enregistrées toutes les 10 minutes. La fréquence d'échantillonnage est fixée à 20 kHz.
- La base de données obtenue est constituée de 2156 fichiers. Chaque fichier est nommé par son horodatage et contient une matrice 8 par 20480 d'une durée de 1 seconde.

III.2.2 Deuxième test

- Un seul accéléromètre est utilisé par roulement.
- On a utilisé une base de données de 984 fichiers (données). Chaque fichier est nommé avec son horodatage et contient une matrice 4x20480 représentant une durée d'une seconde.
- Nous gardons les mêmes outils définis dans le premier test.
- Dans notre travail, nous utilisons les données d'un seul relevé 1×20480 , qui sont récupérées du deuxième test.

La base de données expérimentale contient des signaux de vibration des roulements. Nous supposons qu'il existe un historique de dégradation des roulements sur l'ensemble de données. Par conséquent, les différentes étapes de dégradation peuvent être identifiées et estimées.

Dans l'organigramme suivant sont représentés les principaux processus du pronostic.



Figure III.2 : l'organigramme représenté les principes processus du pronostic.

Nous avons traité les signaux vibratoires des roulements pour sélectionner les indicateurs de dégradation (santé). Nous nous basons sur les paramètres statistiques du domaine temporel,

ces paramètres donnent la possibilité d'identifier les différents stades de dégradation des roulements.

Ces paramètres sont résumés dans le tableau suivant [29] :

<p>Energie</p> $E = \sum_{i=1}^N x_i^2$	<p>Puissance</p> $P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2$
<p>Amplitude crête</p> $S_{crete} = \sup_{1 \leq i \leq N} \ x_i\ $	<p>RMS</p> $S_{eff} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$
<p>Valeur moyenne</p> $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$	<p>Kurtosis</p> $S_{kurt} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{S_{eff}^4}$
<p>Facteur crête</p> $F_e = \frac{S_{crete}}{S_{eff}}$	<p>Facteur K</p> $F_K = S_{crete} \cdot S_{eff} = F_e \cdot S_{eff}^2$
<p>Std</p> $S_{Std} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$	<p>Skewness</p> $S_{kew} = \frac{E(x_i - \bar{x})^3}{a_d^3}$

TAB III .1 : les principaux indicateurs de dégradation.

x : le signal vibratoire dans le domaine temporel.

N : le nombre de point de l'échantillonnage

ad: Ecart type (Standard déviation).

E : Valeur expectative.

La procédure de pronostic est complétée avec les paramètres extraits du domaine fréquentiel.

III.3 Exploitation des résultats

Après la récupération des données et le traitement des signaux moyennant le logiciel **Matlab**, nous avons obtenu les résultats suivants :

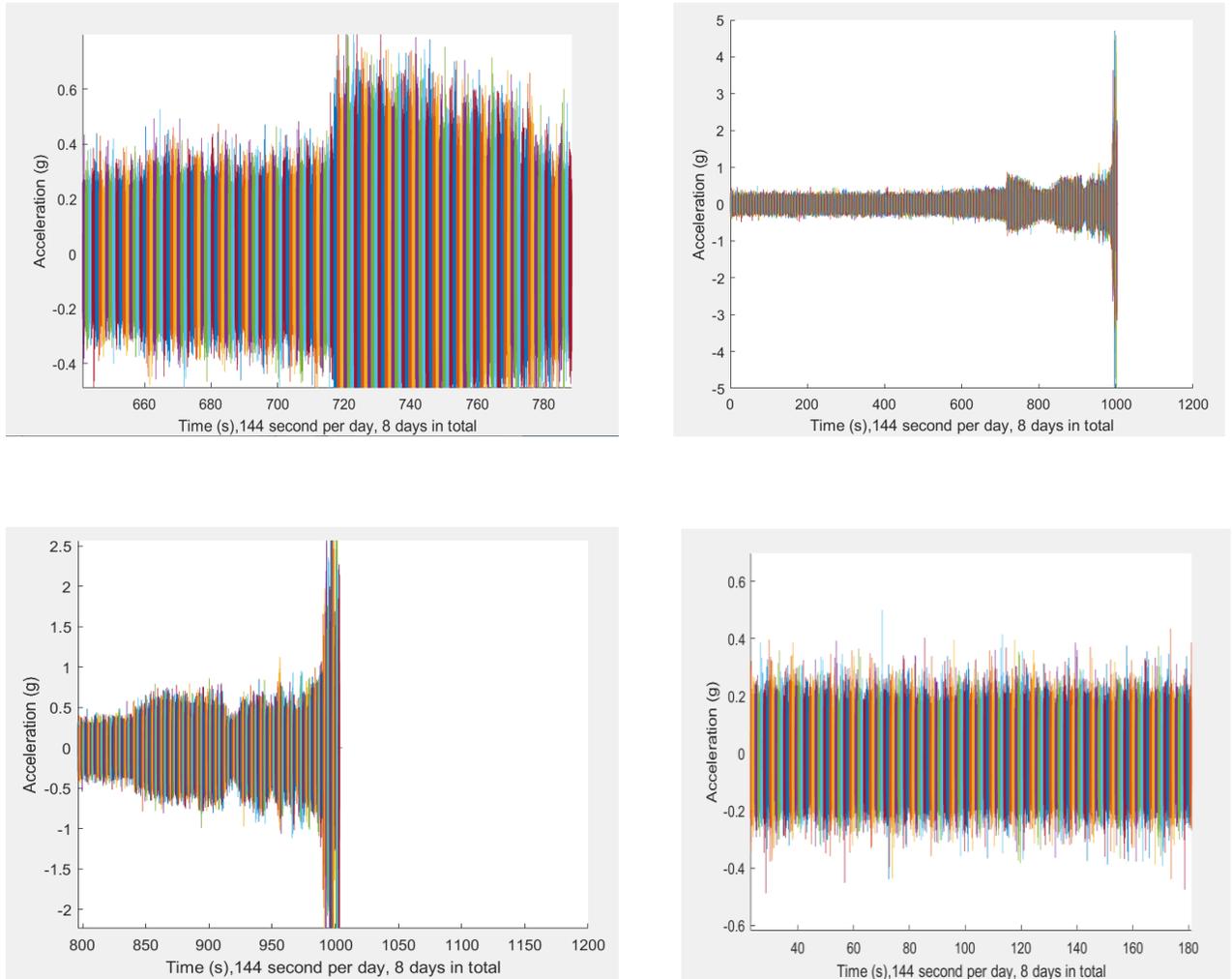


Figure III.3 : signaux vibratoires du roulement en fonction du temps.

On remarque au début le signal de vibration est stable, avec une amplitude au voisinage du 0,25 (g) ($1g=9.8*m/s^2$). Après une durée, l'amplitude du signal vibratoire est augmentée et se transforme avec le temps en un signal impulsionnel qui signifie la défaillance du roulement.

Le premier outil mathématique utilisé pour avoir des informations sur l'état de santé des roulements est la méthode connue par « le Kurtosis ». Le Kurtosis est une mesure du pic, ce qui en fait un bon indicateur d'impulsivité du signal dans le contexte de la détection des défauts pour les composants en rotation comme les machines électriques [31]. Dans ce travail nous avons utilisé un Kurtosis spectral (SK) qui peut indiquer la présence de séries de transitoires et leur localisation dans le domaine fréquentiel. La puissance de cette technique réside dans sa prise en

charge des signaux non stationnaires. L'application du SK sur le signal vibratoire du roulement est illustrée dans la figure (III.4).

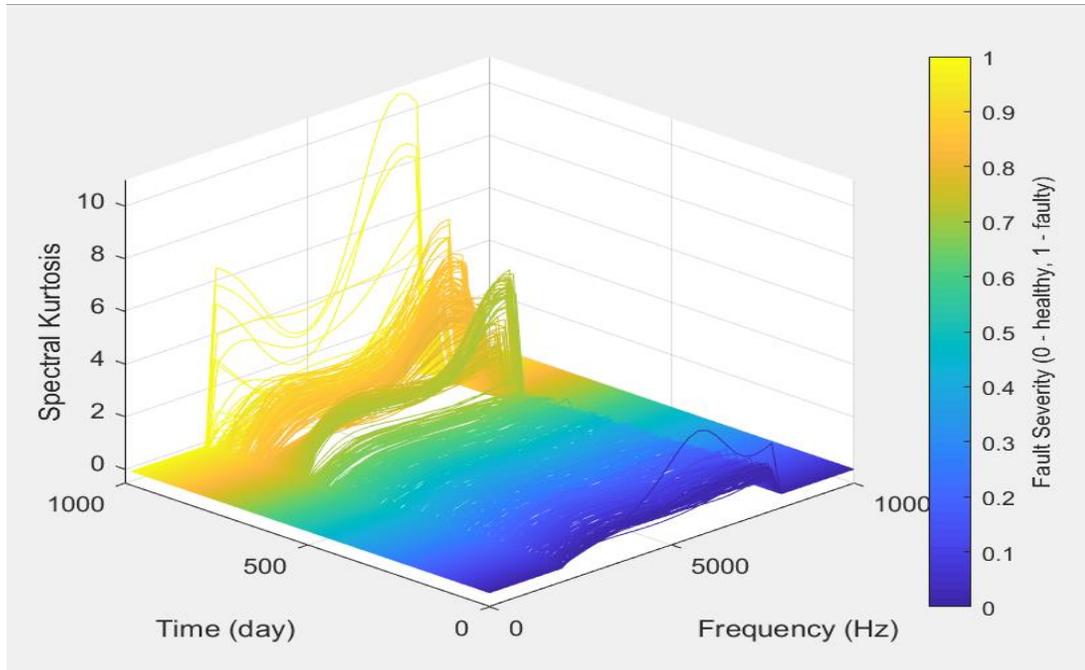


Figure III.4 : Représentation fréquentielle –temporelle de la dégradation.

La figure (III.4) montre clairement la dégradation graduelle de l'état des roulements après 500 secondes.

Les indicateurs en général sont entachés de bruits, la plupart de ces bruits influent sur la détection de temps au début de la prédiction (TSP, Time to Start Prediction) et le temps de vie restant (RUL, Remaining Useful Life). De plus l'indicateur de santé (healty indicator) doit être une fonction monotone pour bien représenter la dégradation. Donc le filtrage du signal de l'indicateur s'impose. Cela est montré sur la figure (III.5) pour l'indicateur valeur efficace RMS [29].

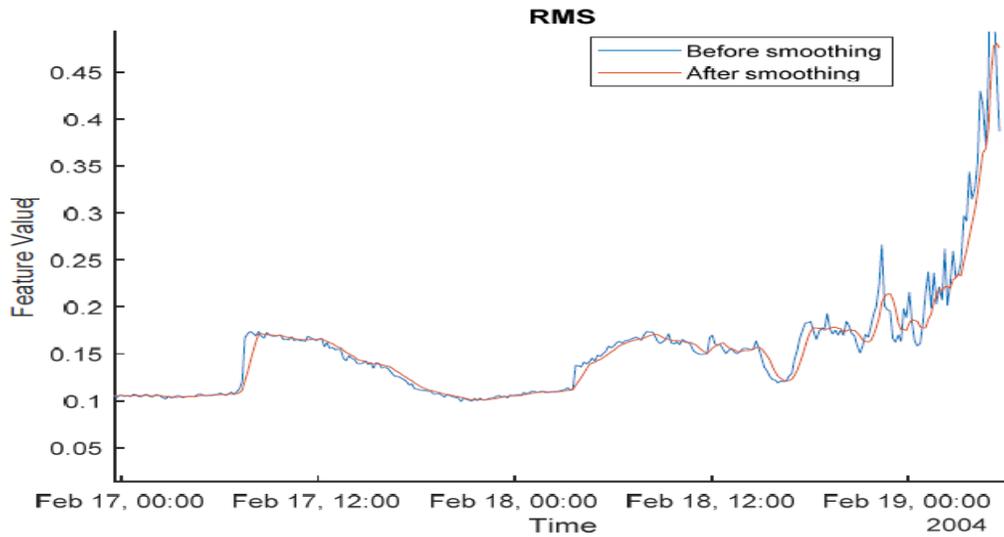


Figure III.5 : Filtrage du paramètre de l'indicateur de santé.

L'histogramme ci-dessous montre la monotonie des différentes métriques utilisées, il est clair dans notre cas que l'indicateur de la valeur efficace (RMS) et l'indicateur énergie sont les meilleurs indicateurs. Ces indicateurs sont donc les plus adaptés pour surveiller la santé des roulements.

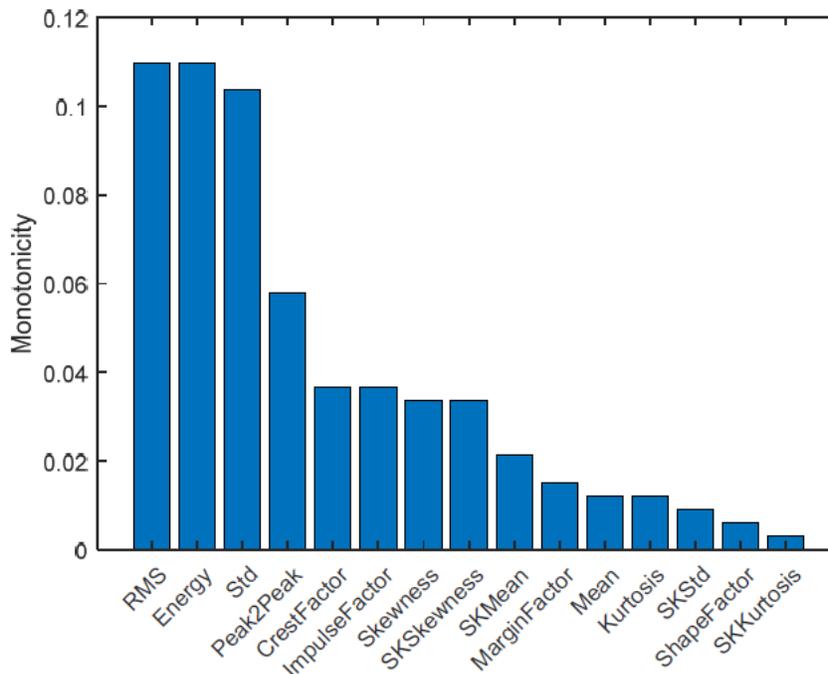
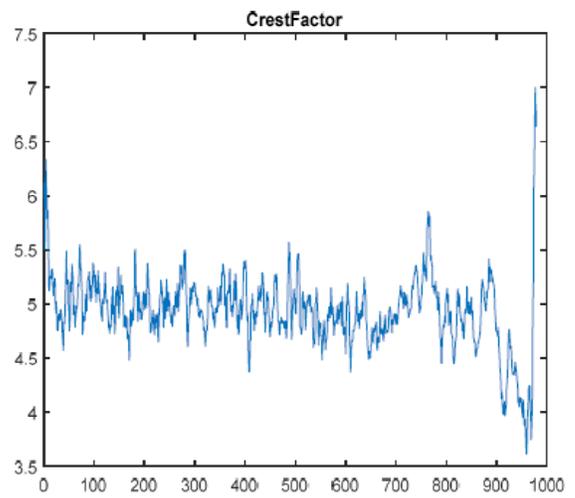
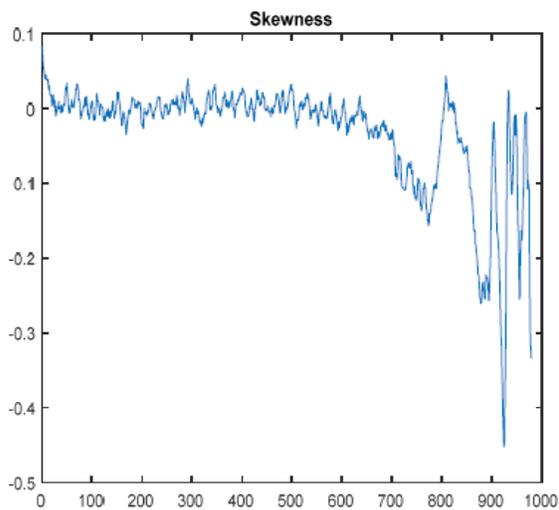
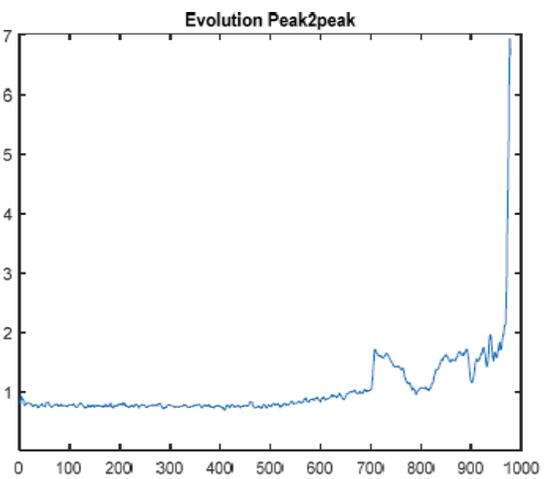
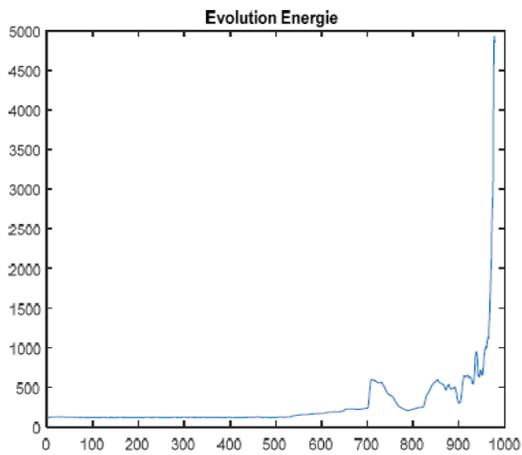
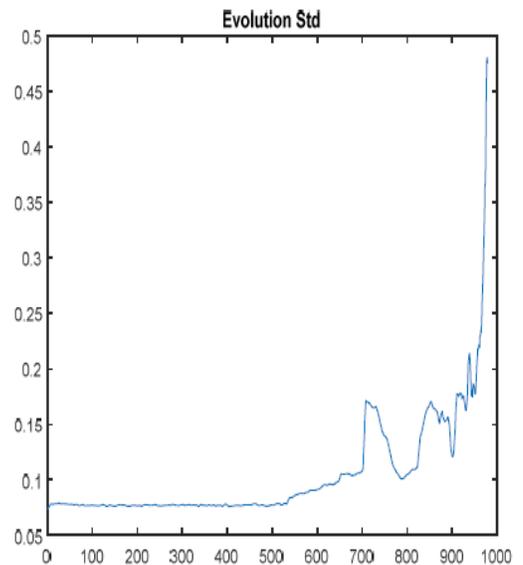
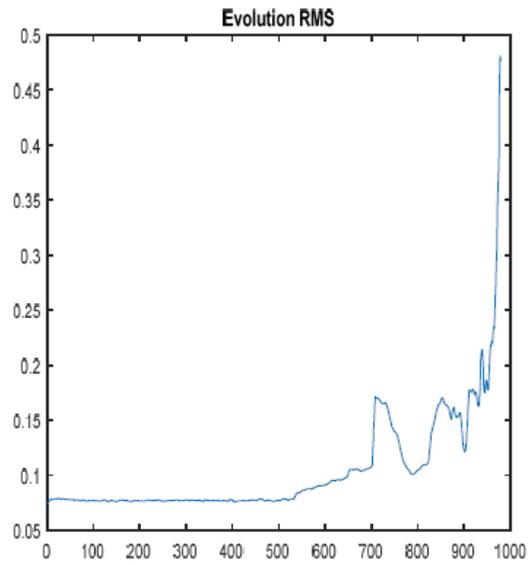


Figure III.6 : Monotonie des indicateurs



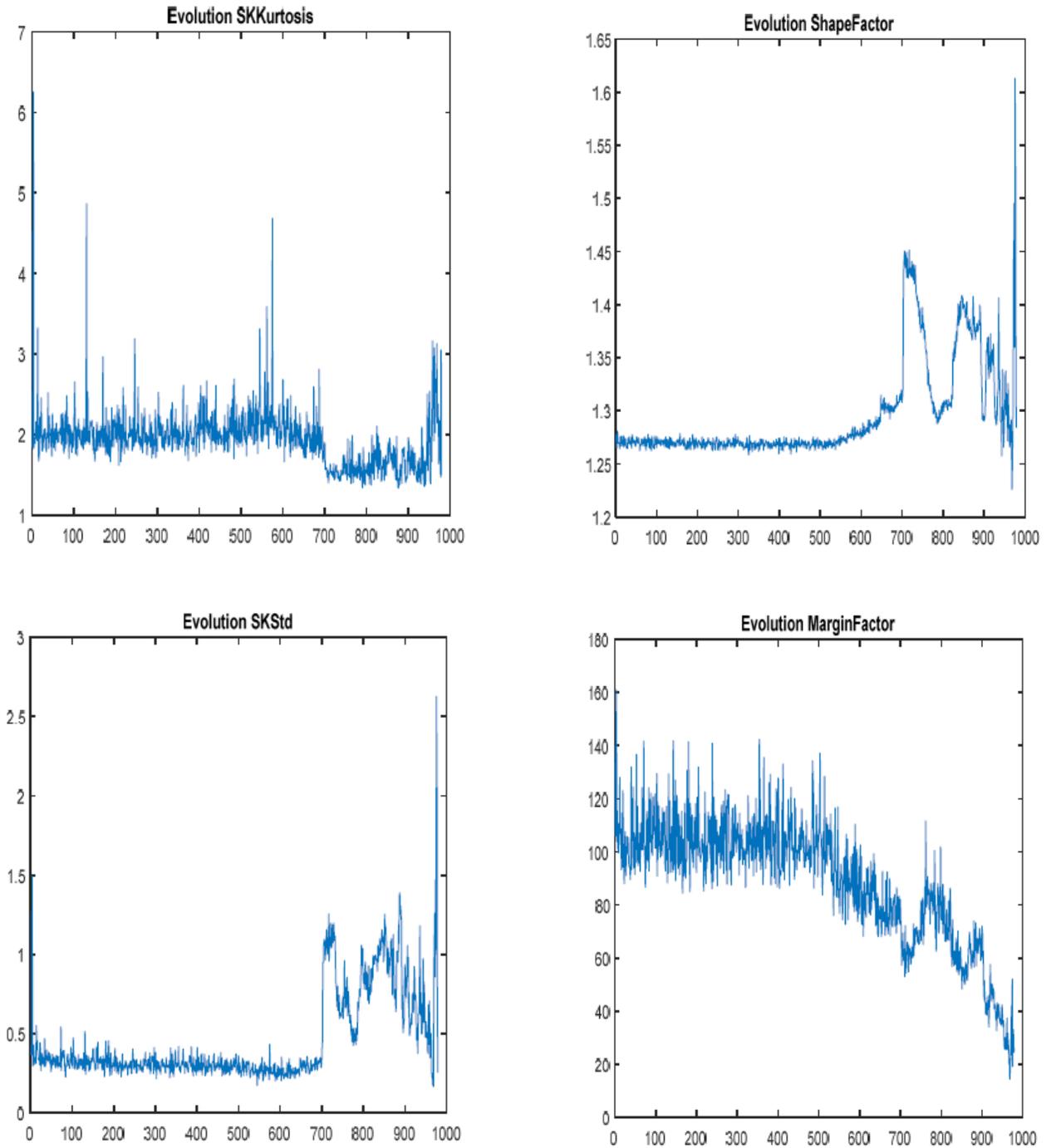


Figure III.7 : Evolution des paramètres de santé pour les roulements en défaut à partir du signal vibratoire temporel.

III.4 Approche pour le pronostic de l'état des roulements (détermination de TSP et RUL)

L'approche proposée, permet de sélectionner le meilleur modèle de régression pour approximer le comportement de dégradation d'un roulement en fonction de la tendance évolutive de son indicateur de santé. Elle est illustrée dans la Figure (III.8). L'approche comporte deux phases distinctes, la détection de TSP (Time to start prediction) et l'estimation de RUL (remining useful life). Le TSP indique le début de la dégradation du roulement, et jusqu'à ce qu'il soit détecté, l'algorithme proposé n'estime pas le RUL du roulement. La détection de TSP commence par une fenêtre de valeurs RMS, qui est d'abord lissée à l'aide de la technique de filtrage linéaire proposée. Un modèle de régression linéaire est ensuite ajusté sur la fenêtre lissée des valeurs RMS. Le gradient du modèle de régression linéaire est utilisé pour déterminer si le roulement a commencé à se dégrader ou non. Si le roulement est déclaré sain, alors la fenêtre des valeurs RMS est mise à jour en incorporant les nouvelles mesures, et ce processus est répété jusqu'à ce que le TSP soit détecté. Une fois le TSP détecté, la méthode proposée suppose le début d'un processus irréversible de dégradation des roulements et entre dans la phase d'estimation du RUL. Au cours de l'estimation RUL, une fenêtre de valeurs RMS est d'abord lissée à l'aide de la technique de filtrage proposée, puis un modèle de régression linéaire est ajusté sur cette fenêtre lissée. Le gradient du modèle de régression linéaire est utilisé pour déterminer si le roulement a échoué ou non. S'il est déterminé un échouement, le processus d'estimation RUL se termine. Le RUL du roulement est estimé en calculant le temps cumulé avant que le gradient de l'indicateur de santé n'atteigne son seuil de défaillance (threshold) [28].

III.4.1 Calcul du TSP et le RUL

Nous supposons que le paramètre au début est régressé à un modèle linéaire [28] :

$$y = wx + b \quad (\text{III.1})$$

Les paramètre w et b sont déterminés en minimisant la fonction $Q(w, b)$ à partir de processus de minimisation

$$\text{Min}(Q(w, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - wx_i - b)^2) \quad (\text{III.2})$$

c-à-d

$$\frac{\partial Q(w,b)}{\partial w} = 0 \quad (\text{III.3})$$

$$\frac{\partial Q(w,b)}{\partial b} = 0 \quad (\text{III.4})$$

$$w = \frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \quad (\text{III.5})$$

$$b = \frac{\sum y_i - w \sum x_i}{n} \quad (\text{III.6})$$

A chaque instant de temps t , $w_t \leq 0$, donc les roulement est en la bonne santé.

Si $w_t > 0$, donc les roulements est en début de dégradation.

Le temps de vie restant RUL est la différent entre le temps d'accès à l'évolution du paramètre de santé au seuil et le temps de début prédictif TSP.

L'organigramme suivant représente les démarches pour la détection du TSP et du RUL :

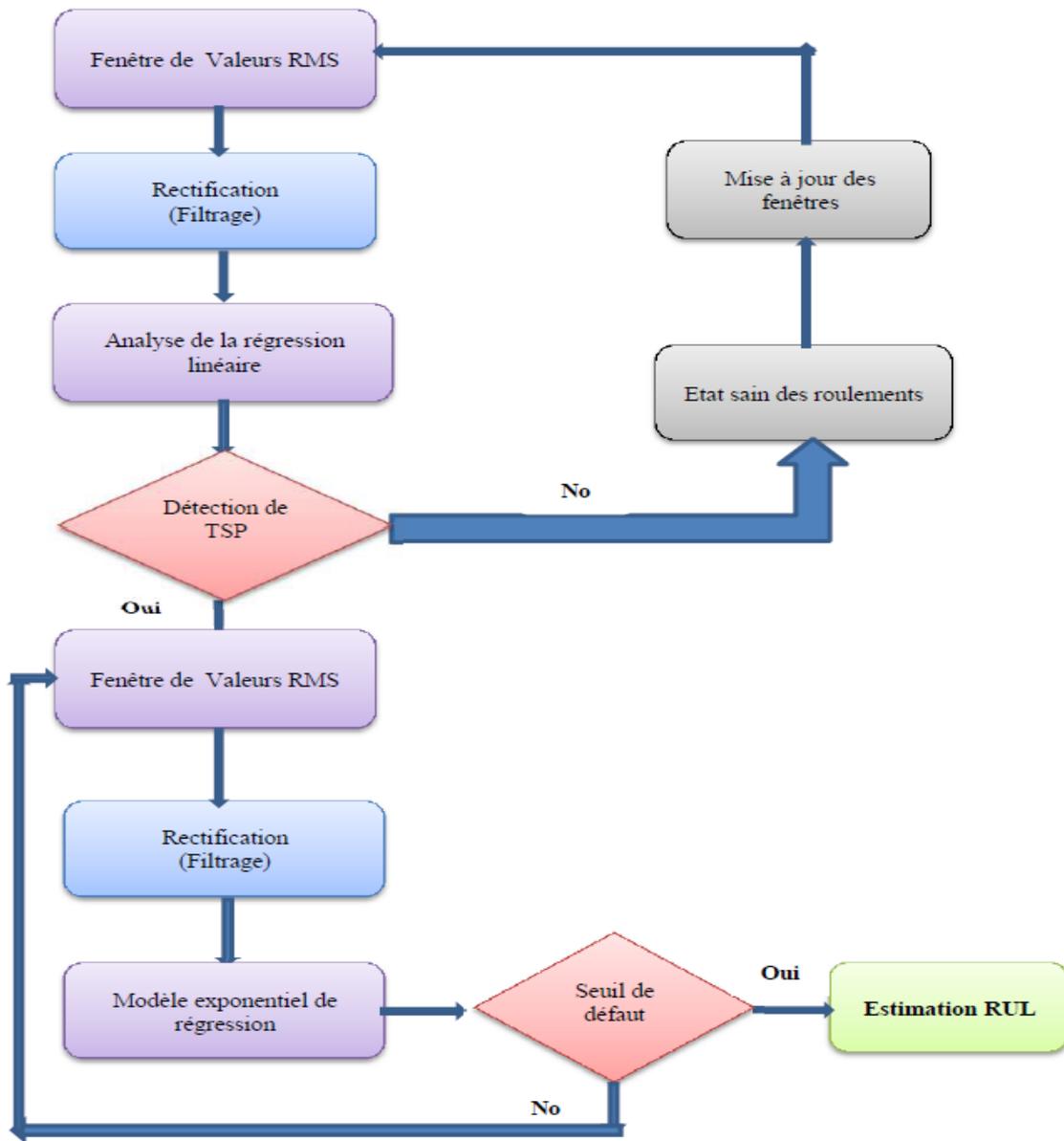


Figure III.8 : Organigramme représente les démarches pour la détection du TSP et du RUL [29].

Le processus ci-dessous est appliqué pour étudier l'évolution de l'état de santé des roulements. L'indicateur de santé utilisé est les valeurs efficaces (RMS). Le résultat est comme le montre dans la figure (III.9) [29] :

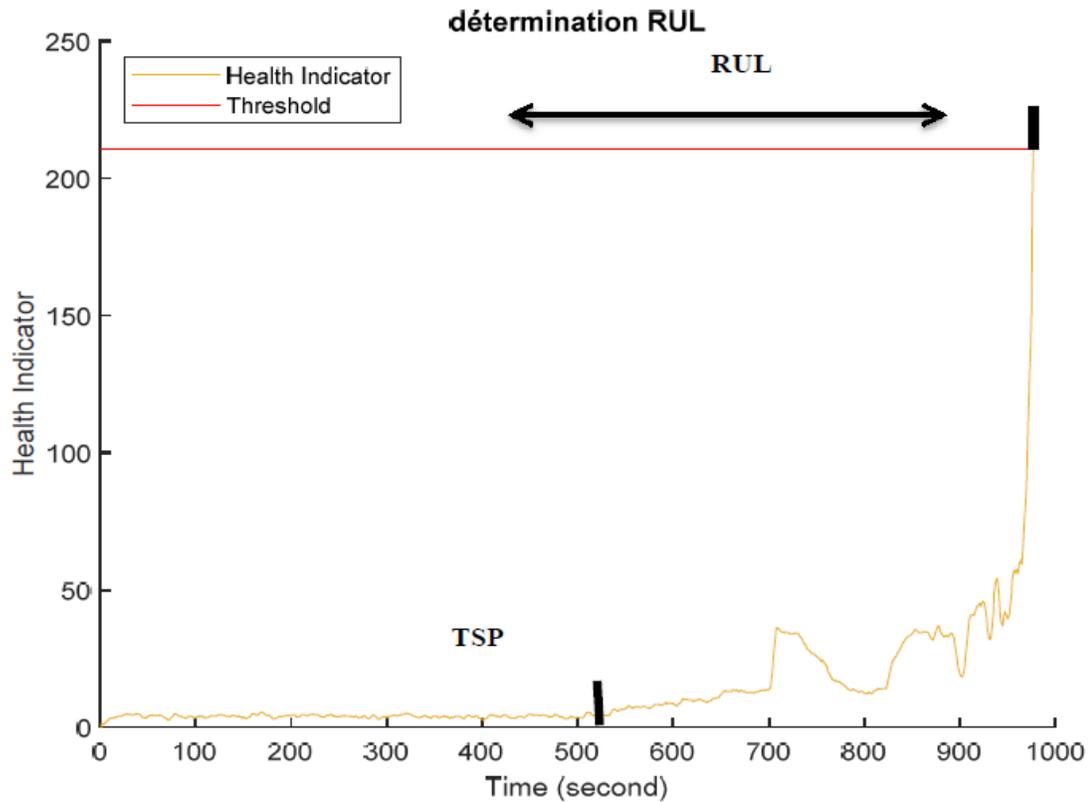


Figure III.9 : Evolution du paramètre de santé et le seuil de défaut.

Le gradient w est positif après 533 secondes de mesure, donc après 5330 minute de fonctionnement la machine entre dans la zone de dégradation et nous avons noté le premier stade de dégradation.

Le temps de début de prédiction (TSP) est détecté. $TSP = 5330$ min.

A partir de diagramme le temps d'accéder au seuil est :

$T_{seuil} = 976$ secondes

Ce qui correspond à $T_{seuil} = 9760$ min

$RUL = T_{seuil} - TSP = 9760 - 5330 = 4430$ min

La durée de vie restant (RUL) est : **4430 min**

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, des techniques statistiques sont appliquées pour suivre l'évolution de la santé des roulements des moteurs asynchrones. Après avoir sélectionné les indicateurs de santé qui doivent avoir des caractéristiques monotonie, la technique consiste en deux étapes, à savoir la détermination du temps de début de détection (TSP), puis le calcul de la durée de vie restante (RUL). La mise en place de cette technologie montre son efficacité dans le suivi de la santé des roulements.

CONCLUSION GENERALE

Compte tenu de l'importance et de l'utilisation fréquente des moteurs asynchrones dans l'industrie, la détection précoce de la panne dans ces moteurs est devenue un enjeu économique important. L'intérêt croissant des constructeurs pour la maintenance des entraînements électriques justifie l'accent mis sur leur diagnostic des machines électriques dans le domaine de la recherche consistant à développer des outils de détection et de diagnostic pour surveiller l'état de fonctionnement de ces machines.

Le travail présenté dans ce mémoire explique les méthodes de détection et de diagnostic par plusieurs techniques pour la surveillance des entraînements électriques, et plus particulièrement de la machine asynchrone à cage d'écureuil. De même, nous avons introduit la notion de pronostic et ce pour connaître à l'avance l'évolution de l'état de santé d'un système électrique, tout en présentant les différentes approches y afférentes.

Nous avons présenté dans ce travail le défaut de court-circuit et le modèle qui permettent la simulation de ce défaut dans les machines asynchrones.

Dans la dernière partie de ce mémoire, une approche basée sur un modèle prédictif est utilisée pour surveiller l'état de santé des roulements dans les machines tournantes en estimant la durée de vie utile restante (RUL) du roulement après détection du (TSP). Cette méthode est validée en utilisant des données expérimentales et un algorithme basé sur le calcul de gradients à l'aide d'une analyse de régression linéaire pour déterminer le temps de démarrage de la prédiction de défaut (TSP).

BEBLIOGRAPHIE

- [1] : **ZOUZOU** sara, Détection des défauts statoriques dans la machine synchrone à aimants permanents par les techniques avancées, Mémoire de magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2015.
- [2] : **ROUAIBIA** reda, « DETECTION ET DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES MOTEURS ASYNCHRONES », MEMOIRE de Magister, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2009.
- [3] : **M. E. K. Oumaamar**. « Surveillance et diagnostic des défauts rotoriques et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée ». Université de Lorraine, 2012. Français. NNT : 2012LORR0022. Tel-01749160.
- [4] : **BICHARI** Meriem, « SYSTEME DE DIAGNOSTIC DES DEFAILLANCES DES MACHINES ELECTRIQUES », MEMOIRE de Magister, UNIVERSITE DE BATNA, 2011/2012.
- [5] : **GUEMRI** Rachid, « Surveillance et diagnostic des machines alternatives Détection des court-circuit entre spires », MEMOIRE de Master, UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE, juin 2015.
- [6] : **HAMOUDI Abdallah**, « Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par les Techniques d'Identification », Thèse de doctorat, UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN, 2017/2018.
- [7] : **J.-C. Trigeassou**, Diagnostic des machines électriques, hermès science publication, France, vol 376, avril 2011.
- [8] : **BAZI** Smail, Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur, Thèse de doctorat, UNIVERSITE DE BATNA 2, 08 Décembre 2016.
- [9] : **BOUSSEKSOU** Radouane, Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic, Mémoire de magister, Université Mentouri Constantine, 2007.
- [10] : **Bouguerne** Abla, Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones, MEMOIRE Magister, Université Mentouri Constantine, 2009.
- [11] : **Chahmi** abdelghani, Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic, thèse de doctorat, UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN, 26/02/2017.

- [12] : **MEDOUED** ammar, SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES MACHINES ELECTRIQUES : APPLICATIONS AUX MOTEURS ASYNCHRONES, thèse de doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda, 08/03/2012.
- [13] : **BELBECHE** Adel, Modélisation, Diagnostic et Commande d'une Machine Asynchrone avec Rupture d'une Phase, Mémoire de magister, Université de Batna, 09/11/2013.
- [14] : **HALEM** Noura, Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis, thèse de doctorat, Université Mohamed Kheider – Biskra, 07/04/2015.
- [15] : **SOUAKER. M. E, GUETROUN.A, ZEKRIA.A**, diagnostic des défauts statoriques des machines asynchrones, Mémoire de master, L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued 16/06/2019.
- [16] : **BABECHE.Y, BOURAS.S**, Diagnostic des machines électriques par la méthode des éléments finis, Mémoire de master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 10/06/2018.
- [17] : **BOUCHAREB** Ilhem, MODELISATIONS ET OUTILS D'AIDE AU DIAGNOSTIC DE DEFAUTS DE MACHINES SYNCHRONES ET A RELUCTANCE VARIABLE, thèse doctorat, Université de Constantine 1, 03/07/2013.
- [18] : **CHERIF** Hakima, Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes, mémoire de magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 30/09/2014.
- [19] : **GHOGGAL** Adel, « Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée : Modèle Dédié à la Détection des Défauts », Mémoire de magister, Université de Batna, 2005
- [20] : **Ali IBRAHIM**, « Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée », thèse de doctorat, Université Jean Monnet-saint-Etienne, 10/mars/2009.
- [21] : **HENNACHE. M, MEBSOUTE. L**, « Modélisation robuste de diagnostic et détection de défauts dans machines électriques », Mémoire d'ingéniera, Centre Universitaire Ziane Achour - Djelfa, 2007.

- [22] : **BACHIR** smail, « CONTRIBUTION AU DIAGNOSTIC DE LA MACHINE ASYNCHRONE PAR ESTIMATION PARAMETRIQUE », Thèse de doctorat, UNIVERSITE DE POITIERS, 17/décembre/2002.
- [23] : **BOUKRA** Tahar, « Diagnostic et pronostic des défauts des Moteurs Asynchrones », thèse de doctorat, Université - 20 Août 1955 – Skikda, 11/Février/2016.
- [24] : **SOUALHI** Abdenour, « Du diagnostic au pronostic de pannes des entraînements électriques », Thèse de doctorat, UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD LYON 1, 2013.
- [25] : **EL KOUJOK** Mohamed, « Contribution au pronostic industriel : intégration de la confiance à un modèle prédictif neuro-flou », Thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ, 2010.
- [26] : **BOUDJERDA. M, SAIDI. Y**, Contribution au pronostic de défaillances d'un système de production à base d'une approche neuro-flou (ANFIS). Application au système CTA de l'unité SAIDAL, Mémoire de master, Université ABOU BAKER BELKAID-Tlemcen, 2017.
- [27]: **M. Roemer, A. Hess, G. Vachtsevanos and F. Lewis**, " Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems," 2006.
- [28]: **W. Ahmad, S. A. Khan and J.-M. Kim**, "A hybrid prognostics technique for rolling element bearing using adaptive predictive models", IEEE Transaction on Industry Electronics, vol. 9, no. 3, pp. 2017.
- [29] : **CHELAGHEMA** Mohamed Lamine, « Pronostic des défauts statoriques et rotoriques des machines asynchrones », Mémoire de master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel, 2019.
- [30]: **Hai Qiu, Jay Lee, Jing Lin**. "Wavelet Filter-based Weak Signature Detection Method and its Application on Roller Bearing Prognostics." Journal of Sound and Vibration 289 (2006) 1066-1090
- [31]: **Y. Wang, J. Xiang, R. Markert and M. Liang**, " Spectral kurtosis for fault detection, diagnosis and prognostics of rotating machines: A review with applications," 2015.