

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



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

Réf :

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

MASTER

Thème

**Diagnostic de défaut de cassures
des barres rotoriques par la
méthode de Prony**

Présenté par :
GHRIEB Ahmed & SLIMANI Abderrahmane
Soutenu le : ... Septembre 2020

Devant le jury composé de :

Mr. BENCHOUIA M. Toufik	Pr	Université de Biskra	Président
Mr. SAHRAOUI Mohamed	Pr	Université de Biskra	Encadreur
Mr. GHOGGAL Adel	Pr	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2019/ 2020

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



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

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

MASTER

Thème

**Diagnostic de défaut de cassures des
barres rotoriques par la méthode de Prony**

Présenté par :

GHRIEB Ahmed

SLIMANI Abderrahmane

Avis favorable de l'encadreur :

Pr. SAHRAOUI Mohamed *Signature*

Avis favorable du Président du Jury

Pr. BENCHOUIA Mohamed Toufik

Signature

Cachet et signature

Résumé

Le travail présenté s'inscrit dans le cadre du diagnostic de défaut de cassures de barre rotoriques dans les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil. Les techniques classiques de traitement du signal et de détection de la défaillance dans ces machines, basées sur l'analyse de Fourier ont prouvées leurs limitations en termes de résolution fréquentielle, ce qui nécessite l'utilisation des nouvelles techniques donnant une analyse plus performante. Pour ces raisons, Nous avons proposé le développement d'un algorithme dédié à l'estimation et le suivi des indicateurs de défaut de cassures de barres en utilise la méthode de Prony modifié à fenêtre glissante STLSP (Short Time Least Square Prony's). Cette méthode est considérée comme une méthode d'estimation spectrale à haute résolution, De plus cet algorithme nécessite un petit nombre d'échantillons pour obtenir des résultats précis.

Mots clés : Méthode de Prony, cassures de barre, diagnostic, Machine asynchrone à cage.

Abstract

The work presented in this study belongs to the framework of diagnosis of the broken rotor bars fault for Squirrel cage induction Motors. the classical Techniques of signal processing and detection of defects in these Motors based on Fourier analysis proved their limited in terms of frequency resolution. Which requires the use of modern Techniques gives a more efficient analysis. For these reasons, this work proposes the development of an algorithm dedicated to the estimation and monitoring of indicators characterizing the rotor bars fault. The proposed algorithm uses the Prony's Short Time Least Square Prony's (STLSP) method. This method is considered as a high frequency resolution method, moreover this algorithm requires a small number of samples (at least 30 samples) to give accurate results.

Keywords: Prony's method, Squirrel cage induction Motors, diagnosis, broken bars.

ملخص

العمل المقدم في هذه المذكرة يدخل تحت إطار تشخيص عطب تكسر قضبان الجزء الدوار في الماكينة الكهربائية اللامتزامنة ذات القفص السنجابي. التقنيات التقليدية لمعالجة الإشارات والكشف عن الأعطاب في هذه الآلات المعتمدة على تحليل Fourier قد أثبتت محدوديتها من حيث التفريق الطيفي، مما يتطلب استخدام تقنيات جديدة تعطي تحليلاً أكثر نجاعة. اقترحنا تطوير خوارزمية مخصصة لتقدير ومراقبة مؤشرات عطب تكسر القضبان باستخدام تقنية STLSP (Short Time Least Square Prony's) هذه التقنية تعتبر من الطرق ذات التفريق الطيفي العالي إضافة الى انها تتطلب عددا صغيرا من العينات لإعطاء نتائج دقيقة.

الكلمات المفتاحية: الماكينة الكهربائية اللامتزامنة، تشخيص، تكسر القضبان، تقنية Prony

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 mes sœurs

A toute ma famille

A tous mes amis et collègues

A tous ceux que j'aime

Ahmed

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 mes sœurs

A toute ma famille

A tous mes amis et collègues

A tous ceux que j'aime

Abdo

Remerciements

Avant tous Nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a donné le courage, la patience, l'aide et la volonté de réaliser ce modeste travail.

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur **Mr. SAHRAOUI Mohamed** pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continuél tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils et remarques.*

Nous remercions également les membres de juré d'avoir acceptés d'examiner ce travail.

Nous n'oublions pas de remercier tous les enseignants qui ont contribués durant notre formation.

Et enfin Nous voudrions associer à nos remerciements toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

Sommalairé

Sommaire

Résumé	
Dédicaces	
Remerciements	
Sommaire	I
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	VI
Liste des abréviations et symboles	VII
Introduction Générale	1
<i>Chapitre I : Etat de l'art</i>	
I.1 Introduction	3
I.2 Définition des termes de base utilisés en diagnostic	3
I.2.1 La maintenance	3
I.2.2 Types de la maintenance	3
I.2.2.1 Maintenance corrective	3
A) Dépannage (palliative)	3
B) Réparation (curative)	3
I.2.2.2 Maintenance préventive	3
A) Préventive systématique	4
B) Préventive conditionnelle	4
C) Préventive prévisionnelle	4
I.2.3 Surveillance	4
I.2.4 Diagnostic	4
I.3 Etude sur la machine asynchrone	5
I.3.1 Le stator	5
I.3.2 Le rotor	5
I.3.3 Les paliers	5
I.4 Les défaillances dans une MAS à cage	6

I.4.1 Défaillances mécaniques	6
I.4.1.1 Défauts de roulement	6
I.4.1.2 Défauts d'excentricité	7
I.4.2 Défaillances électriques	8
I.4.2.1 Défauts statoriques	8
I.4.2.2 Défauts rotoriques	9
A) Défauts de barres	9
B) Ruptures d'une portion d'anneau de court-circuit	9
I.5 Méthodes de diagnostic des MAS	10
I.5.1 Méthodes sans modèle	10
I.5.1.1 Approche signal	10
I.5.1.2 Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle (AI) .	11
I.5.2 Méthodes avec modèle	11
I.6 Conclusion	12
<i>Chapitre II : L'analyse spectrale de courant statorique</i>	
II.1 Introduction	13
II.2 Exploration le contenu spectral du courant statorique	13
II.2.1 Le spectre d'un signal	13
II.2.2 Analyse spectrale du courant statorique	14
II.2.3 Transformée de Fourier rapide (FFT)	14
II.2.4 Les harmoniques présents dans le spectre du courant statorique	14
II.2.4.1 Les harmoniques du temps (TH)	15
II.2.4.2 Les harmoniques d'encoches rotoriques (RSH)	16
II.2.4.3 Les harmoniques de défaut d'excentricité (EFH)	16
II.2.4.4 Les harmoniques des défauts des cassures de barres RBFH	18
II.3 Etude analytique du défaut de cassure de barre	19
II.3.1 Expression des champs magnétiques statoriques et rotoriques	19
II.3.2 Le couple électromagnétique	20
II.3.3 La vitesse de rotation	21

II.3.4 La force électromotrice	21
II.4 Le choix des indicateurs pour la détection de cassures de barres	21
II.5 Conclusion	23
<i>Chapitre III : L'estimation spectrale par la méthode de STLSP</i>	
III.1 Introduction	24
III.2 Méthode de prony	24
III.3 La Méthode de Prony Modifiée	26
III.3.1 Test de la méthode de Prony	27
III.4 La Méthode de Prony à fenêtre glissante STLSP	28
III.4.1 Ajustement de la Méthode de STLSP	29
III.4.2 Teste de la méthode STLSP	29
III.5 Détection de défaut de cassures de barres par la méthode STLSP	31
III.5.1 Banc d'essai	31
III.5.2 Les indicateurs des défauts rotoriques	33
III.5.3 Validation de la méthode STLSP et Résultats	34
III.5.3.1 L'état sain	34
III.5.3.2 Moteur avec défaut (1 barre cassée)	36
III.5.3.3 Moteur avec défaut (2 barre cassée)	38
III.5.4 Remarques et interprétations	41
III.6 Conclusion	43
Conclusion Générale.....	44
Annexe A	
Bibliographie	

Liste des figures

Chapitre I : Etat de l'art

Fig. I. 1 Types de la maintenance. 04

Fig. I. 2 Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. 05

Fig. I. 3 Défauts dans la machine asynchrone triphasée à cage. 06

Fig. I. 4 Structure d'un roulement à billes. 07

Fig. I. 5 Défauts d'excentricité. 07

Fig. I. 6 Représentation des différents défauts statoriques possible. 08

Fig. I. 7 Rotor à cage d'écureuil avec défauts. 10

Chapitre II : L'analyse spectrale de courant statorique

Fig. II. 1 L'évolution temporelle des trois courants d'alimentation avec différentes charges 13

Fig. II. 2 Les harmoniques TH. 15

Fig. II. 3 Les harmoniques de RSH. 16

Fig. II. 4 Les harmoniques EFH. 17

Fig. II. 5 Les harmoniques RBFH (autour de fondamentale). 18

Fig. II. 6 Schéma de fonctionnement pour une machine sain. 20

Fig. II. 7 Schéma de fonctionnement pour une machine avec défaut. 20

Chapitre III : L'estimation spectrale par La méthode STLSP

Fig. III. 1 L'allure temporelle du signal multi harmoniques génère. 27

Fig. III. 2 Spectre du signal généré. 28

Fig. III. 3 L'allure temporelle du signal non stationnaire génère. 30

Fig. III. 4 Les amplitudes estimées par la méthode de STLSP. 30

Fig. III. 5 Les fréquences estimées par la méthode de STLSP. 30

Fig. III. 6 Schéma descriptif de l'application de la STLSP. 31

Fig. III. 7 Le banc d'essai expérimental.	32
Fig. III. 8 Instruments utilisés pour le Banc d'essai.....	32
Fig. III. 9 rotor du moteur 3kW avec deux barres cassées.....	33
Fig. III. 10 Les fréquences autour du fondamental pour l'état sain en Pleine charge.	34
Fig. III. 11 L'amplitude de la fondamental pour l'état sain en Pleine charge.	34
Fig. III. 12 Les indicateurs des défauts rotoriques pour l'état sain en Pleine charge.....	35
Fig. III. 13 Les fréquences autour du fondamental pour l'état sain en moyen charge.	35
Fig. III. 14 Les indicateurs des défauts rotoriques pour l'état sain en moyen charge.	35
Fig. III. 15 Les fréquences autour du fondamental pour l'état sain en faible charge.....	36
Fig. III. 16 Les indicateurs des défauts rotoriques pour l'état sain en faible charge.....	36
Fig. III. 17 Les fréquences autour du fondamental, moteur en pleine charge avec 1 bc.	36
Fig. III. 18 Les indicateurs des défauts rotoriques, moteur en pleine charge avec 1 bc.....	37
Fig. III. 19 Les fréquences autour du fondamental, moteur en moyen charge avec 1 bc.	37
Fig. III. 20 Les indicateurs des défauts rotoriques, moteur en moyen charge avec 1 bc.....	37
Fig. III. 21 Les fréquences autour du fondamental, moteur en faible charge avec 1 bc.....	38
Fig. III. 22 Les indicateurs des défauts rotoriques, moteur en faible charge avec 1 bc.....	38
Fig. III. 23 Les fréquences autour du fondamental, moteur en pleine charge avec 2 bc.	38
Fig. III. 24 Les indicateurs des défauts rotoriques, moteur en pleine charge avec 2 bc.....	39
Fig. III. 25 Les fréquences autour du fondamental, moteur en moyen charge avec 2 bc.....	39
Fig. III. 26 Les indicateurs des défauts rotoriques, moteur en moyen charge avec 2 bc.....	39
Fig. III. 27 Les fréquences autour du fondamental, moteur en faible charge avec 2 bc.....	40
Fig. III. 28 Les indicateurs des défauts rotoriques, moteur en faible charge avec 2 bc.....	40

Liste des tableaux

Tableau II. 1 Expression générale des différentes harmoniques du courant statorique.....	19
Tableau III. 1 Les résultats obtenus par l'application des méthodes : Prony et FFT.	28
Tableau III. 2 Les indicateurs de défaut.....	33
Tableau III. 3 Les indicateurs de défaut de cassure du barres rotoriques en pleine charge.....	40
Tableau III. 4 Les indicateurs de défaut de cassure du barres rotoriques en moyen charge.....	41
Tableau III. 5 Les indicateurs de défaut de cassure du barres rotoriques en faible charge.	41
Tableau III. 6 L'indice de comparaison.....	42

Liste des abréviations et symboles

f_e : La fréquence d'échantillonnage.

T_a : Le temps d'acquisition.

$N_e = N$: Le nombre des échantillons.

ΔF : La résolution fréquentielle.

g : le glissement.

P : nombre de paires de pôles.

N_b : Nombre de barres rotoriques de moteur asynchrone à cage.

f_{TH} : Les harmoniques du temps.

f_{RSH} : Les harmoniques d'encoches rotoriques (Rotor Slots Harmonics RSH en anglais).

f_{EFH} : Les harmoniques de défaut d'excentricité (Eccentricity Fault Harmonics EFH en anglais)

f_{RBFH} : Les harmoniques de défaut des cassures de barres (Rotor Bar Fault Harmonics RBFH).

f_{PSH} : L'harmonique principal d'encoches rotoriques (Principal Slots Harmonics 'PSH' en anglais).

f_r : Fréquence rotorique.

f_s : La fréquence fondamentale.

ν : L'ordre (le rang) des harmoniques du temps.

n_d : l'ordre de l'excentricité.

B_s : Induction magnétique dans l'entrefer créée par le courant statorique.

B_{rd} : Induction magnétique créée dans l'entrefer par le courant du système direct équivalent au rotor.

B_{ri} : Induction magnétique créée dans l'entrefer par le courant du système inverse équivalent au rotor.

i_s : Courants statoriques.

i_{rd} : le courant du système direct équivalent au rotor.

i_{ri} : le courant du système inverse équivalent au rotor.

φ_{Bs} : Phase du champ tournant statorique.

φ_{Brd} : Phase du champ tournant rotorique direct.

φ_{Bri} : Phase du champ tournant rotorique inverse.

Φ_s : Flux magnétique par pôle créé par le courant statorique.

Φ_{rd} : Flux magnétique par pôle créé par le courant du système direct équivalent au rotor.

Φ_{ri} : Flux magnétique par pôle créé par le courant du système inverse équivalent au rotor.

$e(t)$: La force électromotrice (f.e.m).

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide (de l'air).

γ : Inclinaison de l'encoche.

ω_s : Pulsation statorique.

ω_r : Vitesse électrique de rotation.

e : Epaisseur d'entrefer.

l : Longueur de la machine.

W_{mag} : Energie magnétique emmagasinée dans l'entrefer.

W_{srd} : est l'énergie magnétique direct emmagasinée dans l'entrefer.

W_{sri} : est l'énergie magnétique inverse emmagasinée dans l'entrefer.

C_e : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant.

C_{esrd} : le couple électromagnétique constant créé par le système du courant direct au rotor.

C_{esri} : le couple électromagnétique oscillatoire créé par le système du courant inverse au rotor.

p : l'ordre du modèle de Prony.

A_k : l'amplitude du modèle de Prony.

f_k : la fréquence du modèle de Prony.

φ_k : l'angle de phase du modèle de Prony.

a_k : le coefficient d'amortissement du modèle de Prony.

n_h : nombre d'harmoniques à estimer.

STLSP: Short Time Least Square Prony.

STFT: Short Time Fourier Transform.

FFT : Fast Fourier transformation.

DFT : la transformée de Fourier discrète.

MCSA : Motor Current Signature Analysis.

Introduction

Générale

Introduction Générale

Dans un milieu industriel, la Continuité de production, maintien de l'outil, respect de l'environnement et succès économiques ne peuvent être garantis dans le temps qu'à l'aide d'une maintenance industrielle qui prévient efficacement les dégâts et les pannes, et qui utilise d'une façon optimale le potentiel des machines.

Les machines électriques sont des éléments clés dans des nombreux secteurs industriels. Parmi tous les types des machines, Les machines asynchrones sont les plus répandus dus à leurs avantages à savoir, une construction simple, une grande robustesse, un rendement élevé et surtout leur faible coût. Bien que la machine asynchrone à cage soit réputée pour être la plus robuste des machines électriques, un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermiques, électriques, mécaniques et d'environnement) peuvent affecter la durée de vie de celle-ci, en faisant apparaître des défauts électriques ou mécaniques au niveau du stator, ou du rotor, ou les deux en même temps. Une panne dans l'un des organes constitutifs de la machine peut arrêter tout le processus de production, ce qui cause des pertes financières lourdes. Par conséquent, la détection précoce des défauts dans Les machines présente une importance cruciale, ce qui impose donc, la mise en œuvre des systèmes de surveillance adéquats afin d'éviter les arrêts imprévus.

Le processus de la surveillance des machines tournantes menant à un bénéfice en temps et en argent, donc le processus de diagnostic a pour objectif de détecter et localiser les défauts d'une manière précoce. La plupart des méthodes utilisées pour le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones, appartiennent à l'approche signal. La philosophie de cette approche suppose que chaque type de défaut est caractérisé par une propre signature spectrale. Par conséquent, le diagnostic de n'importe quel défaut peut être effectué par la surveillance de sa propre signature dans le spectre fréquentiel des différents signaux issus de la machine tels que : le couple, la vitesse, les courants, le flux, les vibrations, ...

L'analyse des signatures du courant statorique par la transformée de Fourier rapide (ASCS-TFR ou MCSA-FFT en Anglais) est l'une des méthodes les plus populaires dans le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones. Cependant, l'utilisation de cette technique est réservée strictement aux signaux stationnaires donc cette technique perd son efficacité face aux signaux non stationnaire. Cependant, les chercheurs, aujourd'hui, sont en concurrence et accélèrent afin de trouver un moyen plus efficace pour détecter les défauts dans les MAS, et parmi ces techniques on cite, la

transformée de Fourier rapide à fenêtre glissant (STFT en Anglais) ce qui a permis de suivre l'évolution des indicateurs de défaut en fonction du temps (on-line). Malgré les avantages de ce dernier, elle est confrontée au problème de résolution fréquentielle. Ceci montre l'importance du développement des algorithmes de détection de défaut dépassant ces inconvénients et limites.

Pour ces raisons, le travail présenté dans ce mémoire est orienté vers la détection en ligne de défaut de cassures de barres rotoriques dans la machine asynchrone à cage. L'objectif principal de notre travail est le développement d'un algorithme permettant l'estimation et le suivi en ligne des signatures spectrales de ce défaut en utilisant la méthode de Prony modifiée à fenêtre glissante (Short Time Least Square Prony's « STLSP »). Pour atteindre cet objectif, le mémoire a été organisé comme suit :

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art du diagnostic de défaut de la machine asynchrone. Un ensemble de définitions de base concernant la maintenance et le diagnostic. Ensuite, nous rappelons brièvement les principaux éléments constituant cette machine, les différents défauts de cette machine avec leurs causes. Ce chapitre présente aussi une aperçue sur les différentes techniques utilisées pour la détection de ces défauts. Ceci va nous permettre d'avoir une connaissance sur ce qu'il a été présenté dans la littérature et par conséquent de bien positionner notre travail.

Le deuxième chapitre est réservé à l'exploration du contenu spectral du courant statorique comme une méthode de diagnostic basée sur FFT pour une bonne connaissance des défauts et leurs signatures. Ainsi on exposera une étude analytique du moteur asynchrone pendant son fonctionnement avec défauts de barres rotoriques.

Dans la première partie du troisième chapitre, nous présentons notre algorithme qui utilise la méthode STLSP. Ce chapitre exposera avec détail la méthode proposée ainsi que son application pour la détection de défaut de cassures de barres rotoriques. La deuxième partie de ce chapitre sera consacré à des tests, sous différentes conditions de fonctionnement à l'état sain et avec défaut pour évaluer l'efficacité de cette méthode proposée. Une étude comparative entre plusieurs indicateurs de défauts sera aussi présentée.

Une conclusion générale s'impose à la fin de ce mémoire pour évaluer, d'une manière générale, les résultats obtenus devant les objectifs fixés.

chapitre I
Etat de l'art

I.1 Introduction :

Le présent chapitre sera consacré au premier lieu à la présentation des notions et les définitions des termes de base utilisé au champ de la surveillance des défaillances en industrie. Ensuite, un rappel des différents éléments constitutifs de la MAS triphasé à cage d'écureuil. Puis, une analyse de différents défauts pouvant survenir sur chaque partie de la machine sera effectuée. A la fin de ce chapitre, on présente les diverses méthodes et techniques les plus utilisées en diagnostic.

I.2 Définition des termes de base utilisés en diagnostic :

I.2.1 La maintenance :

La tâche principale d'un ingénieur est de garantir la disponibilité des systèmes industriels, c'est-à-dire, d'assurer que le système fonctionne lorsqu'on le sollicite. La responsabilité de cette tâche repose sur la maintenance. Selon l'association française de normalisation (AFNOR), la maintenance est « ensembles des activités destinées à maintenir ou à établir un bien dans un état pour accomplir une fonction requise ». [SAH10]

I.2.2 Types de la maintenance :

I.2.2.1 Maintenance corrective :

Ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise au moins provisoirement : ces activités comportent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, le remise en état avec ou sans modification. Le contrôle du bon fonctionnement. Elle est subdivisée en :

A) Dépannage (palliative) :

Actions physique exécutées pour permettre à un bien en panne d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation soit exécutée.

B) Réparation (curative) :

Action physique exécutées pour rétablir la fonction requis d'un bien en panne.

I.2.2.2 Maintenance préventive :

Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits. Elle est destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien. La maintenance préventive est subdivisée en :

A) Préventive systématique :

Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage (nombre des heures de fonctionnement) mais sans contrôle préalable de l'état du bien.

B) Préventive conditionnelle :

Maintenance basée sur une surveillance du fonctionnement des paramètres significatifs du fonctionnement et intégrant les actions qui en découlent. Ce type de maintenance peut être exécuté selon un calendrier, à la demande ou d'une façon continue.

C) Préventive prévisionnelle :

Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation des paramètres significatifs de la dégradation du fonctionnement.

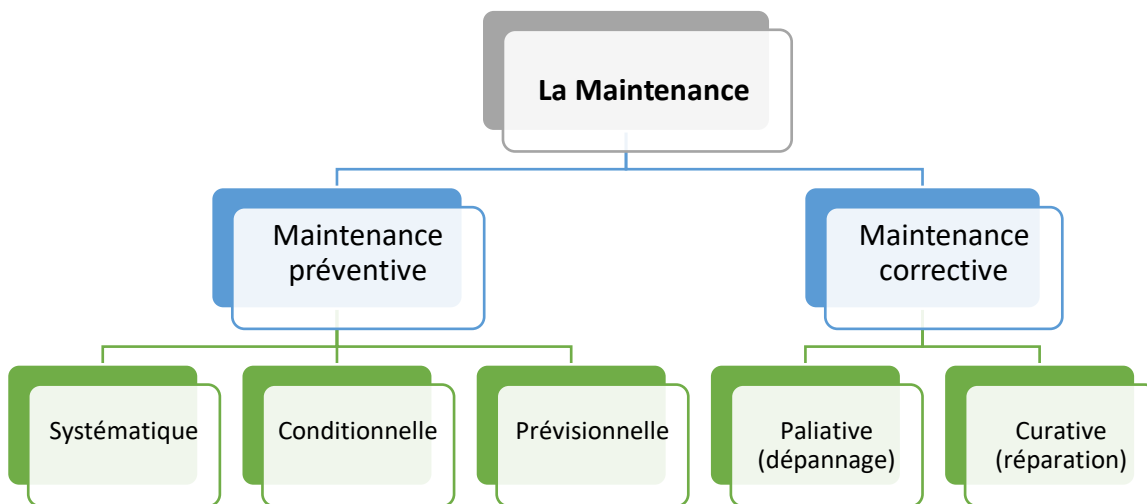


Fig. I. 1 Types de la maintenance.

I.2.3 Surveillance :

Dans l'industrie, la surveillance des machines tend à remplacer la maintenance préventive systématique. L'objectif est de doter ces dispositifs d'un système d'aide à la décision qui informe l'opérateur de l'apparition d'un défaut avant la défaillance totale. [AME18]

I.2.4 Diagnostic :

C'est un ensemble des actions destinées à identifier les causes probables de la défaillance. Les deux principales tâches de diagnostic sont : la détection et la localisation des défauts. La détection consiste à signaler l'existence du défaut, tandis que la localisation ait pour objet d'identifier le type de défaut [SAH10].

I.3 Etude sur la machine asynchrone :

Le système considéré dans ce travail est le moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil (ou MAS à cage d'écureuil). C'est une machine électrique tournante assurant la tâche de la conversion d'énergie par induction électromagnétique. Les parties constitutives de la machine asynchrone sont (Figure I.2) :

I.3.1 Le stator :

C'est la partie fixe de la machine ; Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine.

I.3.2 Le rotor :

C'est la partie tournante de la machine. Dans le cas du rotor à cage, le circuit rotorique est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui de la machine à rotor bobiné. Les conducteurs sont réalisés par empilage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor.

I.3.3 Les paliers :

Sont des organes mécaniques qui permettent la rotation du rotor et assurent le maintien des différents sous-ensembles. Ils sont constitués de deux composants : les flasques et les roulements à billes. [BES16]

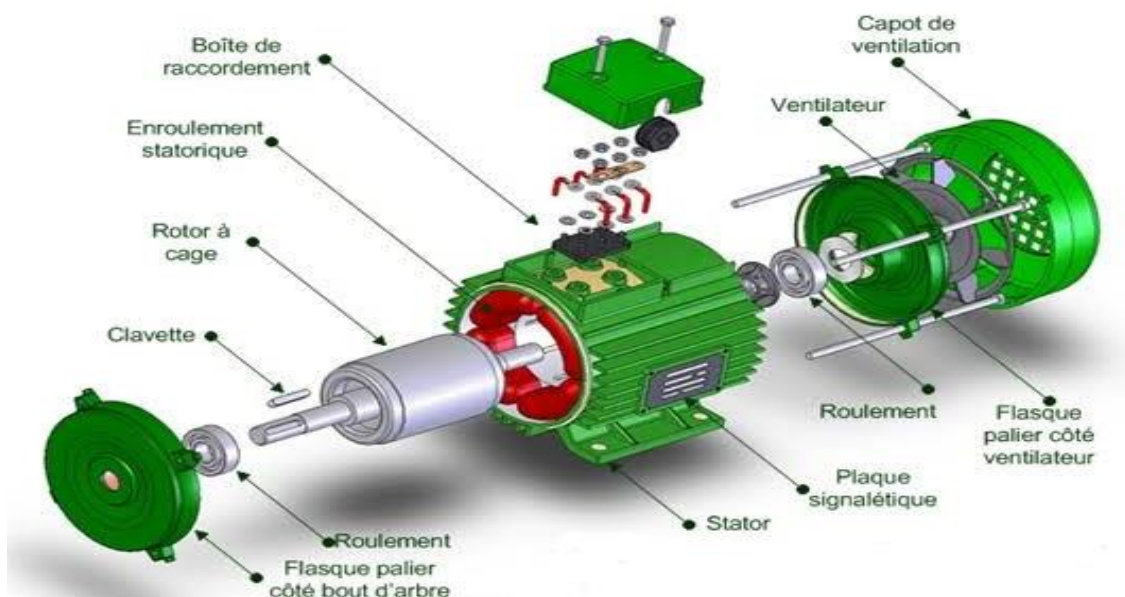


Fig. I. 2 Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

I.4 Les défaillances dans une MAS à cage :

En général, les défauts dans le moteur asynchrone peuvent être classés en défauts électriques et mécaniques. Les défauts électriques/asymétries peuvent être classés en défauts statoriques et rotoriques. Tous ces défauts possibles dans les moteurs asynchrones et de leurs sous-ensembles correspondants sont résumés comme représentés dans le schéma fonctionnel de la (Figure I.3) :

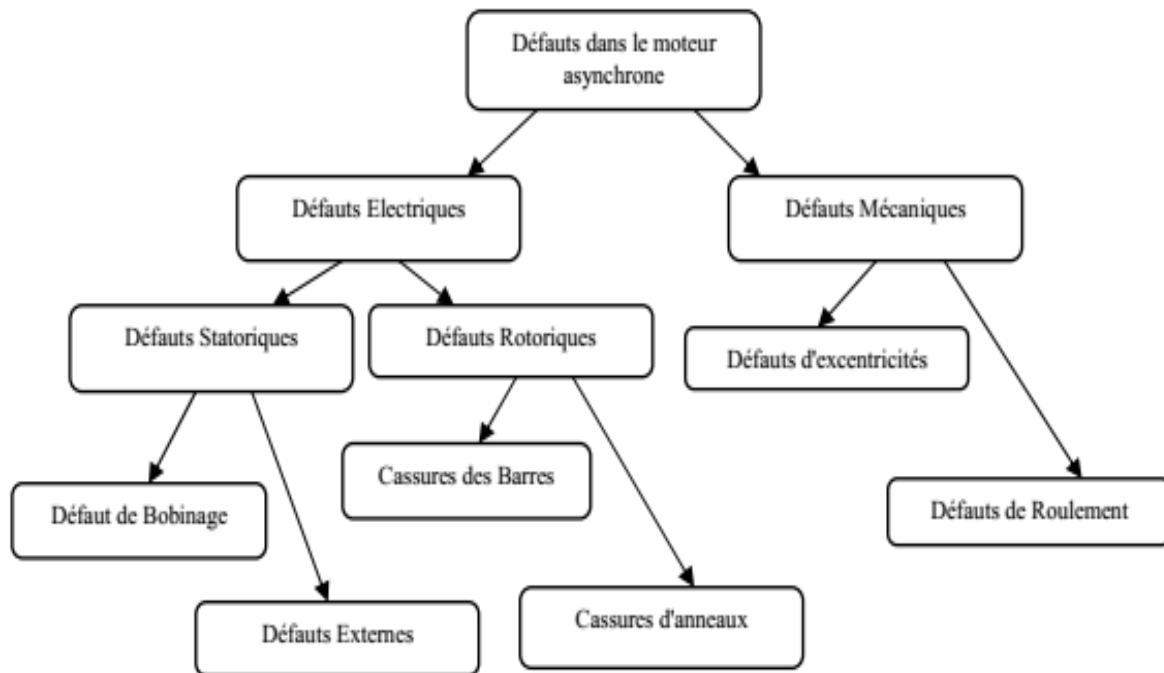


Fig. I. 3 Défauts dans la machine asynchrone triphasée à cage. [KEC17]

I.4.1 Défaillances mécaniques :

I.4.1.1 Défauts de roulement :

Les roulements à billes (Figure I.4) jouent un rôle très important dans tout type de machines électriques tournantes. D'une manière générale, toute insertion en force des roulements à billes sur l'arbre, est susceptible de créer des indentations sur les surfaces de contact, voire une fracture directe. Le champ axial peut induire des courants électriques qui vont circuler au niveau des roulements à billes, ce qui accélère leur détérioration. En plus, la graisse qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certains cas, se rigidifier et causer une résistance à la rotation. [SAH10]

Suivant l'emplacement géométrique du défaut dans le roulement, nous pouvons distinguer les types de défauts suivants [HAL15] :

- Défaut de bague extérieure.

- Défaut de bague intérieure.
- Défaut de billes.

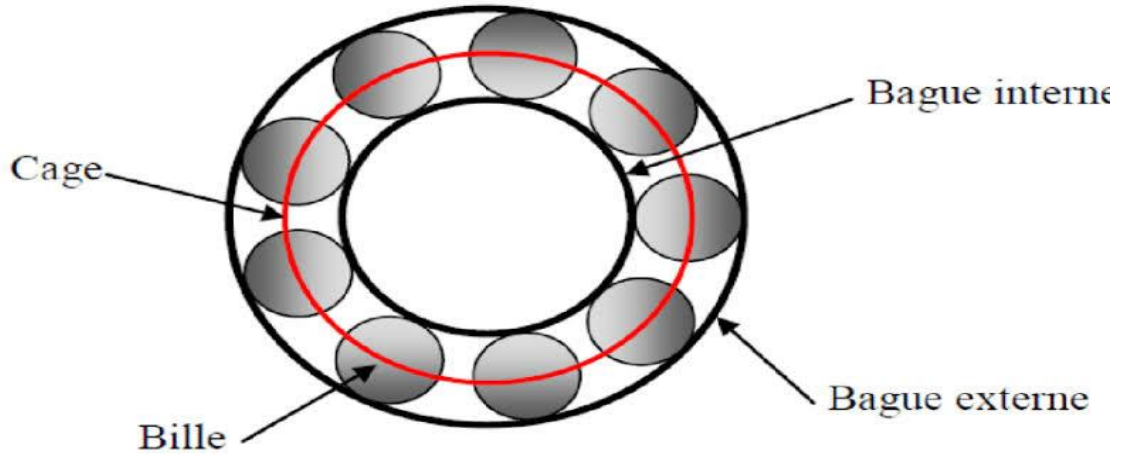


Fig. I. 4 Structure d'un roulement à billes.

I.4.1.2 Défauts d'excentricité

Parfois, la machine peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor). Ce phénomène est appelé excentricité dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage).

On distingue trois catégories d'excentricité (Figure I.5) :

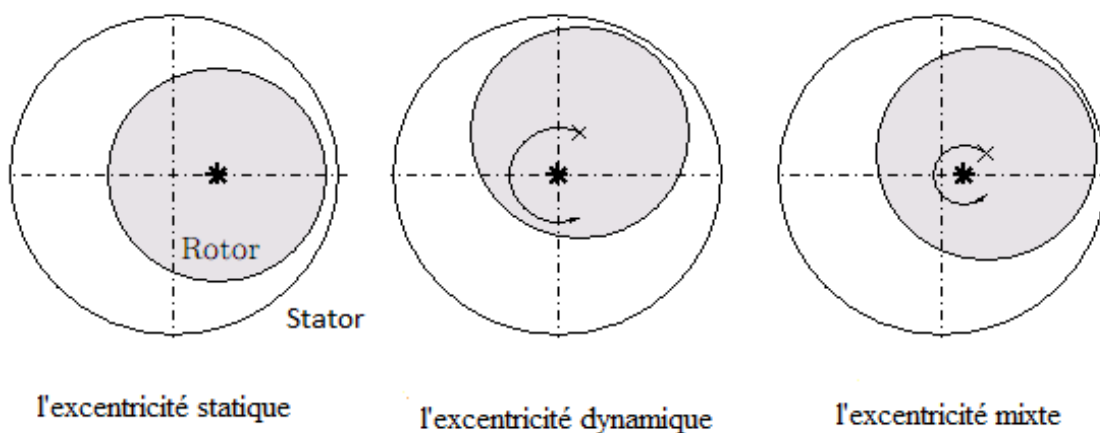


Fig. I. 5 Défauts d'excentricité.

- **L'excentricité statique** : est généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator.
- **L'excentricité dynamique** : se manifeste lorsque le centre de rotation du rotor diffère du centre géométrique du stator mais, de plus le centre de rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique ou statorique.
- **L'excentricité mixte** : représente la somme des deux cas statique et dynamique. [BES16]

I.4.2 Défaillances électriques :

I.4.2.1 Défauts statoriques :

La plupart des défauts statoriques sont dues à des défauts d'isolement (Figure I.6). Le défaut de court-circuit entre spires peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique. Il apparaît à l'intérieur des encoches statoriques, entraînant une augmentation du courant local au niveau de la zone de défaut ce qui provoque l'élévation de la température dans cette zone ce qui mène à un court-circuit d'autres spires et par conséquent l'aggravation de la sévérité du défaut.

D'autres types de défauts au stator sont généralement distingués :

- *Les courts circuits entre une phase et le neutre.*
- *Les courts circuits entre une phase et la carcasse métallique.*
- *Les courts circuits entre deux phases statoriques.*
- *Ouvertures de phases, Coupure d'une phase.*
- *Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles)*
- *Défaillances de la boîte à bornes. [KEC17, BES16, BES17, SAH10]*

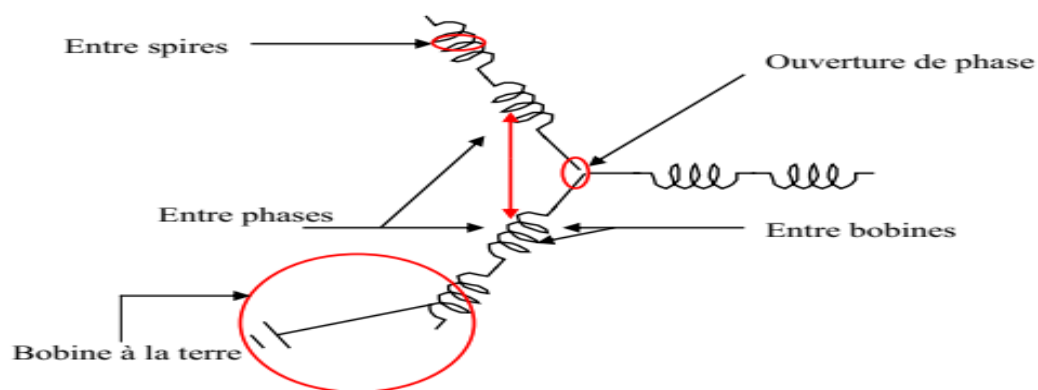


Fig. I. 6 Représentation des différents défauts statoriques possible. [BES17]

I.4.2.2 Défauts rotoriques :

Pour une machine asynchrone à cage d'écureuil, les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit. (Figure I.7) :

A) Défauts de barres :

Un défaut de barres rotoriques peut être une fissure ou une rupture totale. Il peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau de court-circuit. Les défauts de barres peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, etc.), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures). 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. [HAL15]

B) Ruptures d'une portion d'anneau de court-circuit :

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux.

Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé 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...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres. [BES17].

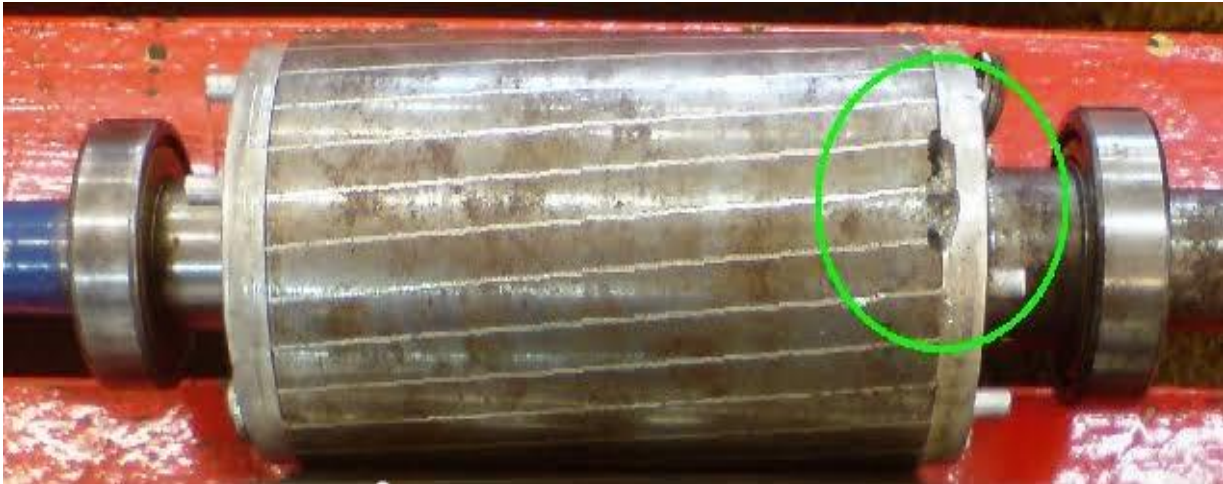


Fig. I. 7 Rotor à cage d'écoreuil avec défauts.

I.5 Méthodes de diagnostic des MAS :

Ces dernières années, plusieurs techniques de détection de défauts ont été proposées dans la littérature. Elles se sont concentrées sur la diversité des problèmes rencontrés et en ont fait un sujet important pour de nombreux chercheurs. Le but de cette section est de présenter un panorama des méthodes de diagnostic appliquées aux machines à induction. Ces méthodes sont classées en deux grandes catégories : Méthodes sans modèle et Méthodes avec modèle.

I.5.1 Méthodes sans modèle :

Les méthodes sans modèle peuvent être classées aussi en deux familles : la première appartient à l'approche signal. La deuxième utilise les systèmes experts mettant en œuvre des techniques d'intelligence artificielle.

I.5.1.1 Approche signal :

Les méthodes de traitement du signal et d'analyse spectrale sont largement appliquées dans l'industrie pour la surveillance des machines tournantes. Dans le présent contexte, pour effectuer le diagnostic d'une défaillance ou d'une dégradation, les opérateurs de la maintenance analysent un certain nombre de signaux issus de la machine tels que : les courants, les puissances, le couple, la vitesse, le flux, les vibrations, ...etc. En effet, l'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux contiennent des informations jugées pertinentes par les spécialistes pour la détection les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de cette machine. [AME18]

Le diagnostic à travers cette approche nécessite une bonne connaissance des défauts et leurs signatures. Parmi les méthodes appartenant à cette approche, on cite :

- *Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques.*
- *Diagnostic par l'analyse du courant statorique.*
- *Diagnostic par l'analyse du Vecteur de Park.*
- *Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique.*
- *Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite.*
- *Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites.*
- *Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée. [SAH10, YAH12]*

I.5.1.2 Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle (AI) :

Ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle (IA). L'IA est une approche efficace pour modéliser des systèmes non linéaires complexes. Ces méthodes sont basées sur la connaissance a priori du système en utilisant un ensemble de règles et de faits (données manipulées par les règles) qui constituent, ce qu'on appelle la base de connaissance. Parmi ces méthodes, on peut regrouper en quatre grandes familles [MEN07, BES16] :

- *Méthodes de reconnaissance des formes.*
- *Diagnostic par systèmes experts.*
- *Diagnostic par logique floue.*
- *Diagnostic par réseaux de neurones.*

I.5.2 Méthodes avec modèle :

Ces méthodes sont issues principalement de l'automatique et supposent une connaissance a priori du système. Elles peuvent s'appuyer sur le suivi d'évolution des paramètres caractéristiques du système étudié. La comparaison des paramètres mesurés représentant le fonctionnement du système et des paramètres calculés par les modèles (ou des paramètres estimés) permet la détection ainsi que l'identification de la défaillance susceptible de se produire. Ces techniques supposent la connaissance de la plage de variation de ces modèles et de leurs paramètres selon les conditions de Fonctionnement du système [MEN07, BES16]. Ces techniques peuvent être classées en trois catégories citées ci-après:

- *Techniques d'estimation d'état (surveillance à base des observateurs).*
- *Technique de génération des résidus.*

- *Techniques d'identification*

I.6 Conclusion :

Ce chapitre a été, essentiellement dédié à l'état de l'art sur le diagnostic des défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil, quelques rappels sur les termes ainsi que les notions utilisées en diagnostic sont présentés. Une description de la constitution de la MAS à cage d'écureuil a été présentée, ainsi que les différents types des défauts qui peuvent affecter la machine et leurs origines. En fin, un panorama sur les méthodes utilisées dans le diagnostic des défauts de la machine a été présenté.

Comme ce travail est consacré à l'étude et la détection des défauts de cassures de barres dans la cage rotorique d'un moteur asynchrone. Ce qui fera l'objet du deuxième chapitre.

chapitre III
L'analyse spectrale de
courant statorique

II.1 Introduction :

Parmi les méthodes que nous avons mentionnées dans le premier chapitre, l'approche la plus utilisée pour détecter les défauts dans les machines asynchrones est l'analyse spectrale des signaux (grandeurs mesurables : les courants statoriques, le couple, la vitesse, les vibrations, la puissance...), ces techniques se basent sur la comparaison des grandeurs de la machine à l'état sain et avec les mêmes grandeurs à l'état avec défaut, Peut apparaître des nouvelles composantes spectrales (signature propre de défaut) ou seulement une modification des amplitudes des composantes spectrales déjà existantes, Donc il est Nécessaire de bien comprendre et de bien interpréter les spectres de ces grandeurs, que ce soit à l'état sain ou en présence de défauts.

Comme ce travail est consacré à l'étude et la détection des défauts de cassures de barres dans la cage rotorique d'un moteur asynchrone par l'approche signal, Plus précisément, l'analyse spectrale de courant statorique. Pour cela et dans ce chapitre, nous allons étudier cette méthode et explorer le contenu spectral du courant statorique pendant l'état sain et avec défaut, puis une étude analytique du défaut de cassures de barres et les indicateurs qui peut utiliser pour la détection de ce défaut.

II.2 Exploration le contenu spectral du courant statorique :

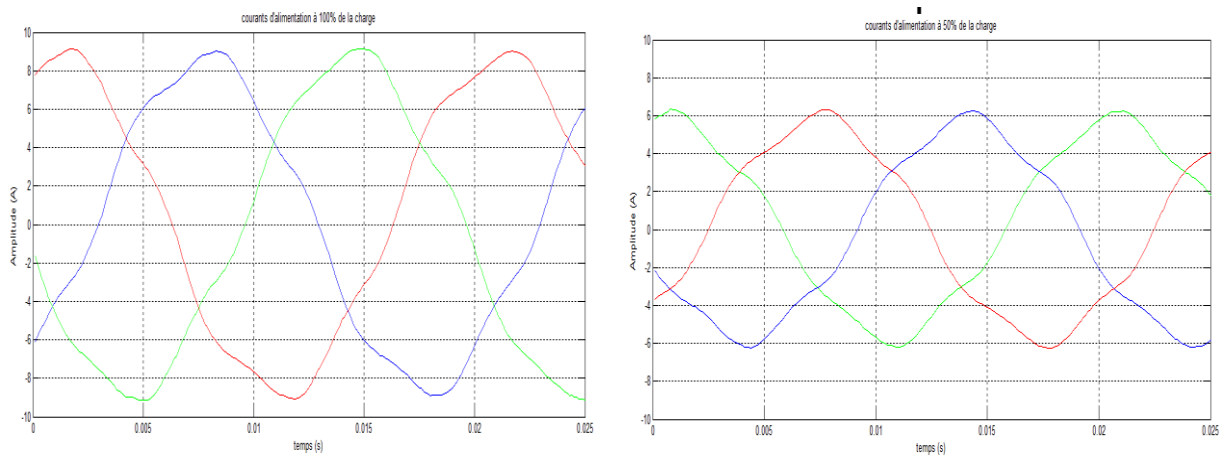


Fig. II. 1 L'évolution temporelle des trois courants d'alimentation avec différentes charges

Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'informations sur l'état de la machine, on est obligé d'aller vers les méthodes de traitement de signal.

II.2.1 Le spectre d'un signal :

Le spectre d'un signal est la représentation en fonction de la fréquence des amplitudes des différentes composantes présentes dans le signal.

II.2.2 Analyse spectrale du courant statorique :

Parmi tous les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants, car il est facile à mesurer et nous permet de détecter les défauts électriques, y compris les défauts purement mécaniques. Cette méthode qui est connue sous le nom "Motor Current Signature Analysis" (MCSA), se base sur les phénomènes électro-magnétiques qui se transforment, par influence à une information dans le courant statorique. Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique par :

- L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux paramètres physiques de la machine (nombre de barres rotoriques et nombre des paires de pôles).
- La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présents dans le spectre du courant. La surveillance via le courant statorique, nécessite une bonne connaissance des défauts et de leurs signatures. [BES17, SAH10]

Parmi les techniques plus utilisées pour analyser et traiter les différents signaux issus des machines électriques, on trouve la méthode basée sur la Transformée de Fourier Rapide (FFT). [SAH10]

II.2.3 Transformée de Fourier rapide (FFT) :

Considérons le signal $x(t)$ à temps continu. Si x est d'énergie finie, sa transformée de Fourier rapide (TF) à la fréquence f est la suivante :

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

Avec un ordinateur, il est impossible de calculer la FFT $X(f)$ pour une valeur quelconque de la fréquence f . Donc, on ne calcule la FFT que pour des multiples de Δf . C'est la notion de la Transformée de Fourier Discrète (DFT). En conséquence, la DFT $X(n)$ d'un signal échantillonné $x(k)$ est donnée par :

$$X(n) = \sum_{k=1}^{N_e} x(k) e^{-j2\pi k \frac{n}{N_e}} \quad \text{II. 2}$$

Avec $n = 1, 2, 3 \dots N_e$.

Il est important de noter que la résolution fréquentielle joue un rôle primordial quant à la clarté du spectre, elle doit être de faible valeur pour qu'on puisse séparer les harmoniques proches. [YAH12, SAH10]

II.2.4 Les harmoniques présents dans le spectre du courant statorique :

Comme nous l'avons évoqué précédemment un ordinateur ne peut traiter que des signaux numériques, ceux-ci sont obtenus après un échantillonnage. Dans notre cas, le signal à analyser est le courant statorique. L'acquisition a été faite selon les paramètres suivants :

- ✓ La fréquence d'échantillonnage : $F_e = 10000 \text{ Hz}$
- ✓ Le temps d'acquisition : $T_a = 10 \text{ sec}$
- ✓ Le nombre des échantillons : $N_e = \frac{T_a}{T_e} = F_e \cdot T_a = 10000 \times 10 = 100000 \text{ échant}$
- ✓ La résolution fréquentielle : $\Delta f = \frac{f_e}{N_e} = \frac{10000}{100000} = 0.1 \text{ Hz}$

D'après l'Etude analytique effectuée dans [SAH 10] sur la machine asynchrone afin d'interpréter le contenu harmonique des courants statoriques pendant l'état sain. On trouve quatre types d'harmoniques qui sont toujours présents dans le spectre du courant statorique :

II.2.4.1 Les harmoniques du temps (TH) :

Ce type d'harmonique est toujours présents dans le spectre du courant statorique même à l'état sain, ils sont imposés par la source d'alimentation ou l'asymétrie du bobinage. Ces harmoniques sont données par les expressions suivant :

$$f_{TH} = \nu \cdot f_s$$

II. 3

Où : f_s l'harmonique fondamental, ν le rang des harmoniques du temps ($\nu = 1,3,5\dots$)

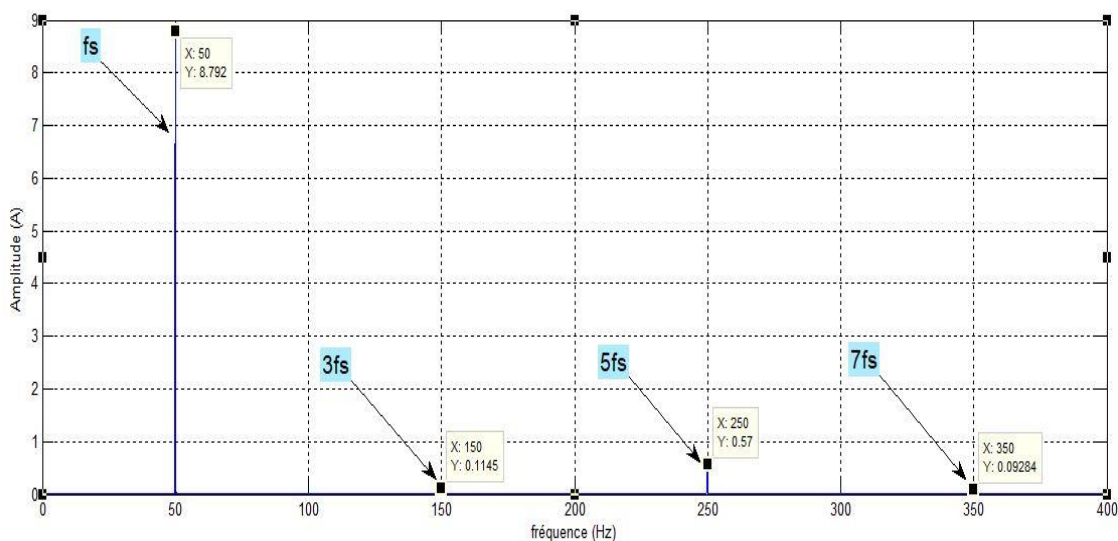


Fig. II. 2 Les harmoniques TH.

II.2.4.2 Les harmoniques d'encoches rotoriques (RSH) :

En réalité, l'induction magnétique dans l'entrefer n'est pas sinusoïdale, elle est fonction de différents paramètres, tel que la disposition du bobinage statorique et de la structure de la cage rotorique dans le cas des moteurs à cage. A cause de cette structure, Il a été démontré qu'en plus de l'harmonique fondamental, apparaissent dans le spectre du courant statorique des harmoniques dite d'encoches rotoriques ayant pour fréquences :

$$f_{RSH} = \left| \left(\nu \pm \frac{kN_b}{P} (1 - g) \right) f_s \right| \quad \text{II. 4}$$

Avec : ν est le rang des harmoniques du temps, P le nombre de paires de pôles, N_b le nombre de barres rotoriques et k un entier positif.

Pour $k=1$ et $\nu=1$, on définit les harmoniques d'encoches principales (Principal Slots Harmonics 'PSH' en anglais). [GHO05, YAH12]

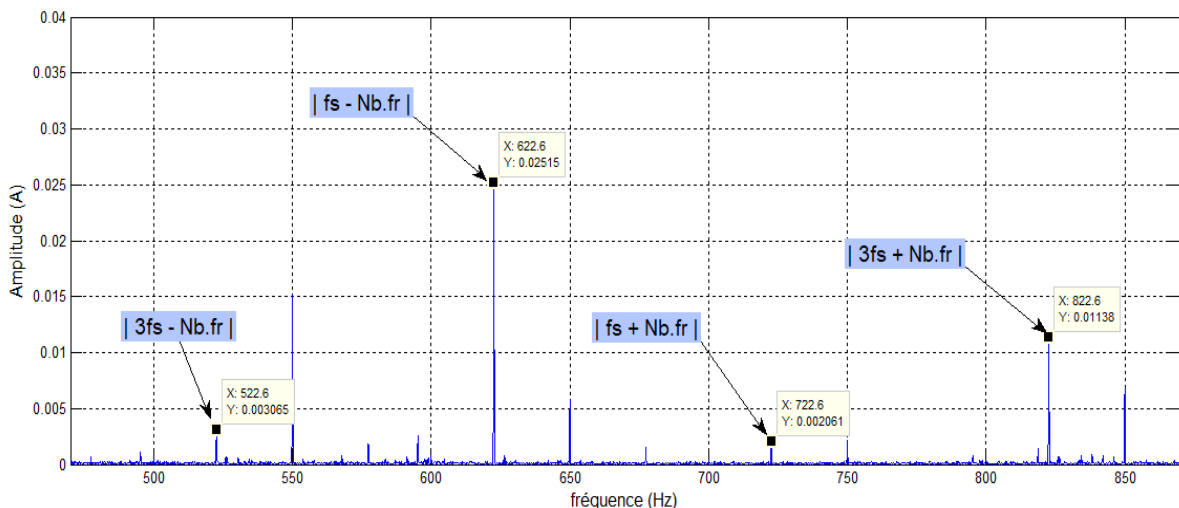


Fig. II. 3 Les harmoniques de RSH.

II.2.4.3 Les harmoniques de défaut d'excentricité (EFH) :

L'excentricité de la machine est le résultat du non uniformité d'entrefer. Ce défaut peut être la cause d'une flexion de l'arbre, d'un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator, de l'usure du roulement ou encore d'un déplacement du noyau statorique. Il existe trois types d'excentricité (Comme nous l'avons évoqué précédemment dans le chapitre I).

La présence de l'excentricité se manifeste par la création d'harmoniques dans le spectre du courant statorique à des fréquences données par :

$$f_{ecc} = \left[\left(\frac{kN_b \pm n_d}{p} \right) (1 - g) \pm v \right] f_s \quad \text{II. 5}$$

Avec k un entier, ($v = 1, 3, 5 \dots$), n_d l'ordre de l'excentricité. n_d égal à 0 pour l'excentricité statique et 1, 2, 3, ... pour l'excentricité dynamique.

Une autre série d'harmoniques liés à la coexistence des deux types d'excentricité en même temps, apparaît à des fréquences données par :

$$f_{ecc_{mix}} = |vf_s \pm kf_r| \quad \text{II. 6}$$

Tel que k est un entier positif. Il n'est pas besoin avec cette expression de connaître les paramètres de la machine tel que N_b et c 'est ce qui la rend parfois avantageuse.

Il est évident que tous les moteurs, même à l'état sain, présentent un petit niveau d'excentricité mixte. Pour cela, il est presque impossible de réaliser une excentricité purement statique ou purement dynamique. Cela signifie qu'on ne peut pas étudier expérimentalement l'excentricité statique séparément à celle dynamique.

Les harmoniques de fréquences $|vf_s \pm kf_r|$ sont les signatures principales de ce défaut et on va les désignés par EFH (Eccentricity Fault Harmonics). [SAH 10, GHO05, YAH12]

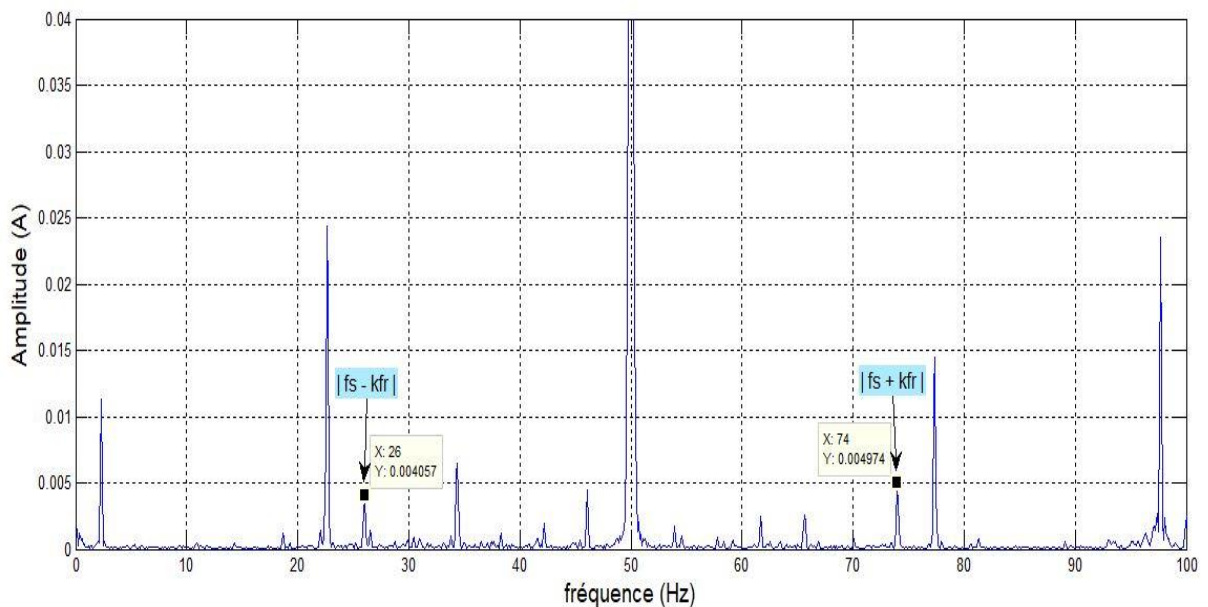


Fig. II. 4 Les harmoniques EFH.

II.2.4.4 Les harmoniques des défauts des cassures de barres RBFH :

Un défaut dans le rotor va engendrer une sorte d'asymétrie qui, dans le cas d'une alimentation par un système de tensions triphasé symétrique, va être à l'origine d'un champ magnétique inverse de fréquence $-gf$ dans le circuit rotorique. Cela va engendrer des courants circulant dans le circuit statorique à une fréquence $(1-2g)fs$.

Une autre composante apparaît aussi dans le spectre du courant statorique à une fréquence $(1+2g)fs$. Cette composante est due aux fluctuations de la vitesse provoquées par les oscillations du couple [GHO05, YAH12]. Il a été démontré qu'un processus répétitif donne naissance à une série d'harmoniques dont les fréquences sont données par :

$$f_{RBFH} = (1 \pm 2kg) f_s \quad \text{II. 7}$$

Avec $k = 1, 2, 3, \dots$

En tenant en compte des harmoniques du temps qui sont toujours présents dans les tensions d'alimentation, on peut aboutir aux formules générales suivantes :

$$f_{RBFH} = (v \pm 2kg) f_s \quad \text{II. 8}$$

Avec $v = 1, 3, 5, \dots$ est le rang des harmoniques du temps.

Les harmoniques de ces dernières fréquences sont les harmoniques représentant les signatures d'un défaut de cassure de barres RBFH (Rotor Bar Fault Harmonics).

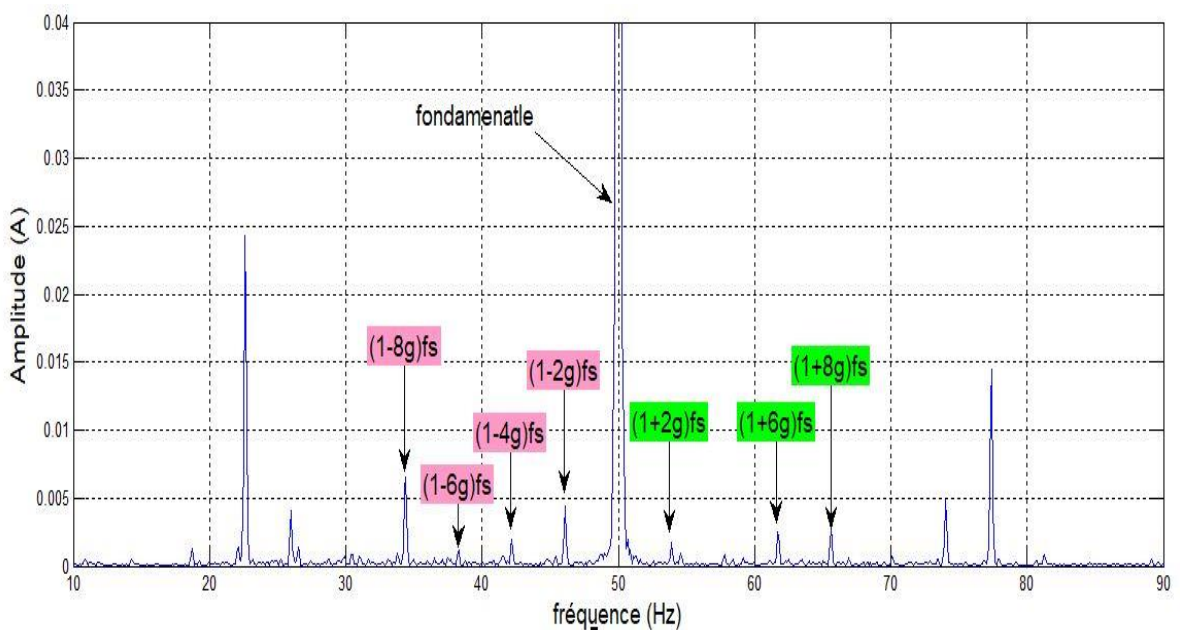


Fig. II. 5 Les harmoniques RBFH (autour de fondamentale).

Types d'harmoniques	Leurs fréquences caractéristiques	Leurs causes
Harmoniques de temps (TH)	$f_{TH} = v \cdot f_s$	Ce type d'harmonique est Imposés par la source d'alimentation ou l'asymétrie du bobinage
Harmoniques des encoches rotoriques (RSH)	$f_{RSH} = vf_s \pm kN_b f_r $	Causés par la structure Naturelle de la MAS
Harmoniques des défauts de barres rotoriques (RBFH)	$f_{RBFH} = (v \pm 2kg)f_s $	Sont dus à l'asymétrie résiduelle du moteur au niveau du rotor.
Harmoniques des défauts d'excentricité (EFH)	$f_{EFH} = vf_s \pm kf_r $	Sont dus à un certain degré d'excentricité mixte résiduelle

Tableau II. 1 Expression générale des différentes harmoniques du courant statorique

II.3 Etude analytique du défaut de cassure de barre :

Les oscillations du couple et de la vitesse, ainsi que la modulation de l'enveloppe du courant statorique lors d'une rupture de barres rotoriques, sont des phénomènes qui nécessitent une analyse et une explication.

II.3.1 Expression des champs magnétiques statoriques et rotoriques :

Supposons une distribution sinusoïdale du champ magnétique dans l'entrefer. L'induction magnétique dans un point M situé dans l'entrefer, dans un repère lié au stator est donné par :

$$\mathbf{B}_s(t) = k_s i_s \cos(\omega_s t - \theta_M + \varphi_{B_s}) \quad \text{II. 9}$$

θ_M : position du point M.

La présence d'une barre rompue dans la cage rotorique, provoque une asymétrie géométrique et électromagnétique dans les circuits du rotor. Les courants induits vont créer en plus du champ tournant direct B_{rd} un autre champ tournant inverse B_{ri} .

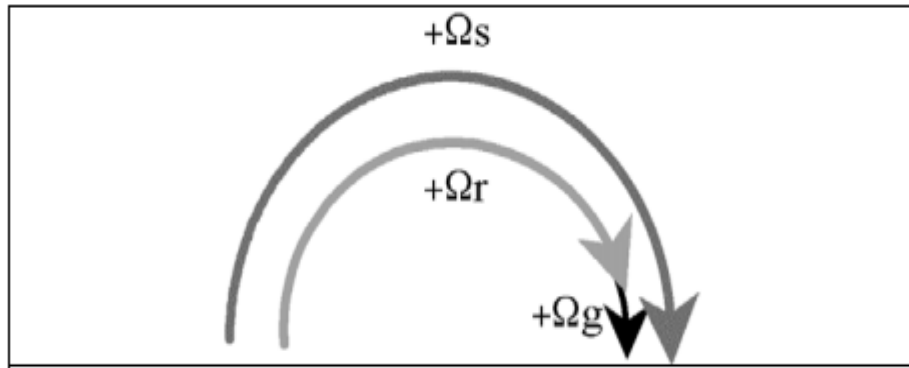


Fig. II. 6 Schéma de fonctionnement pour une machine saine.

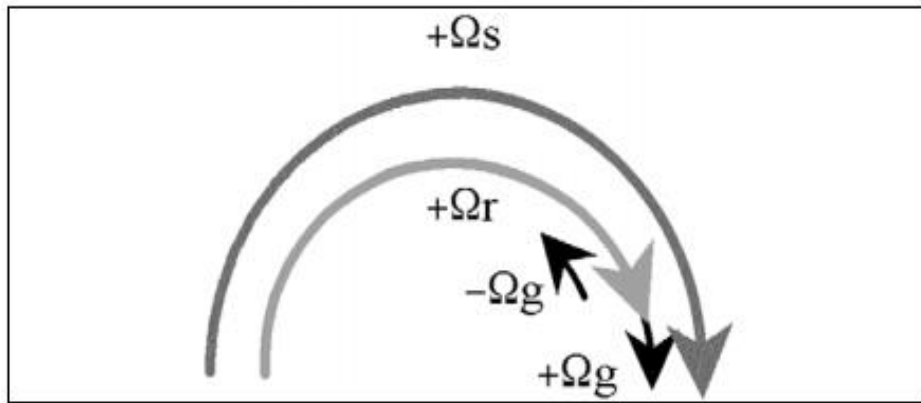


Fig. II. 7 Schéma de fonctionnement pour une machine avec défaut.

Dans un repère lié au stator, on aura :

- Le champ tournant direct tourne à la vitesse : $\omega_m + \omega_r = (1-g)\omega_s + g\omega_s = \omega_s$ donc :

$$\mathbf{B}_{rd}(t) = k_{rd} i_{rd} \cos(\omega_s t - \theta_M + \varphi_{B_{rd}}) \quad \text{II.10}$$

- Le champ tournant inverse tourne à la vitesse : $\omega_m - \omega_r = (1-g)\omega_s - g\omega_s = (1-2g)\omega_s$ donc :

$$\mathbf{B}_{ri}(t) = k_{ri} i_{ri} \cos((1-2g)\omega_s t - \theta_M + \varphi_{B_{ri}}) \quad \text{II.11}$$

II.3.2 Le couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique est donné par :

$$\mathcal{C}_{e_{tot}} = \frac{dW_{mag}}{d\gamma} = \frac{dW_{srd}}{d\gamma_{srd}} + \frac{dW_{sri}}{d\gamma_{sri}} \quad \text{II.12}$$

W_{mag} : est l'énergie magnétique emmagasinée dans l'entrefer.

W_{srd} : est l'énergie magnétique direct emmagasinée dans l'entrefer.

W_{sri} : est l'énergie magnétique inverse emmagasinée dans l'entrefer.

Avec :

$$W_{srd} = \frac{Rle}{2\mu_0} \int_0^{2\pi} 2B_s B_{rd} d\theta = \frac{Rle\pi}{\mu_0} k_s i_s k_{rd} i_{rd} \sin(\varphi_{B_s} - \varphi_{B_{rd}}) \quad \text{II.13}$$

$$W_{sri} = \frac{Rle}{2\mu_0} \int_0^{2\pi} 2B_s B_{ri} d\theta = \frac{Rle\pi}{\mu_0} k_s i_s k_{ri} i_{ri} \sin(2g\omega_s t + \varphi_{B_s} - \varphi_{B_{ri}}) \quad \text{II.14}$$

$$\begin{cases} \gamma_{srd} = (\varphi_{B_s} - \varphi_{B_{rd}}) \\ \gamma_{sri} = (\varphi_{B_s} - \varphi_{B_{ri}}) \end{cases} \quad \text{II.15}$$

L'expression II.12, du couple électromagnétique, devient :

$$\begin{aligned} C_{e_{tot}} &= C_{e_{srd}} + C_{e_{sri}} \quad \text{II.16} \\ &= \frac{Rle\pi}{\mu_0} k_s i_s k_{rd} i_{rd} \cos(\varphi_{B_s} - \varphi_{B_{rd}}) + \frac{Rle\pi}{\mu_0} k_s i_s k_{ri} i_{ri} \cos(2g\omega_s t + \varphi_{B_s} - \varphi_{B_{ri}}) \end{aligned}$$

Il est clair, que le couple électromagnétique est la somme d'une composante constante et une composante oscillatoire. Le système de courant directe au rotor, est à l'origine de la composante constante. En présence du défaut, le système inverse de courant au rotor produit la composante oscillatoire de pulsation $2g\omega_s$.

II.3.3 La vitesse de rotation :

D'après l'équation mécanique, on a :

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = C_{e_{tot}} - C_r - k_0 \omega_m \quad \text{II.17}$$

En négligeant le coefficient de frottement k_0 , et en supposant qu'en régime permanent $C_r = C_{e_{srd}}$. On obtient :

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = C_{e_{srd}} + C_{e_{sri}} - C_r = C_{e_{sri}} \quad \text{II.18}$$

Après l'intégration, on aura :

$$\omega_m(t) = (1 - g)\omega_s - \frac{1}{2gJ\omega_s} \frac{\pi Rle}{\mu_0} k_s i_s k_{ri} i_{ri} \cos(2g\omega_s t + \varphi_{B_s} - \varphi_{B_{ri}}) \quad \text{II.19}$$

De l'expression (II.19), on peut constater que la composante oscillatoire du couple, produit une oscillation de pulsation $2g\omega_s$ dans la vitesse.

II.3.4 La force électromotrice :

Si un conducteur de longueur l , passant par le point M, situé dans l'entrefer, la f.e.m induite dans ce conducteur est donnée par (loi de Lenz) :

$$e(t) = - \frac{d\phi_s}{dt} - \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \frac{d\phi_{ri}}{dt} \quad \text{II.20}$$

$$e(t) = -B_s(t)Rl\omega_s - B_{rd}(t)Rl(\omega_m(t) + g\omega_s) - B_{ri}(t)Rl(\omega_m(t) - g\omega_s) \quad \text{II. 21}$$

En remplaçant $\omega_m(t)$, $B_s(t)$, $B_{rd}(t)$ et $B_{ri}(t)$ par ses expressions, on obtient :

$$\begin{aligned} e(t) = & -k_s i_s R l \omega_s \cos(\omega_s t - \theta_M + \varphi_{B_s}) \\ & - k_{rd} i_{rd} R l \omega_s \cos(\omega_s t - \theta_M + \varphi_{B_{rd}}) \\ & + k_{rd} i_{rd} R l K \cos((1 - 2g)\omega_s t - \theta_M - \varphi_{B_s} + \varphi_{B_{rd}} + \varphi_{B_{ri}}) \\ & + k_{rd} i_{rd} R l K \cos((1 + 2g)\omega_s t - \theta_M - \varphi_{B_s} + \varphi_{B_{rd}} - \varphi_{B_{ri}}) \\ & - k_{ri} i_{ri} R l (1 - 2g)\omega_s \cos((1 - 2g)\omega_s t - \theta_M + \varphi_{B_{ri}}) \\ & + k_{ri} i_{ri} R l K \cos((1 - 4g)\omega_s t - \theta_M - \varphi_{B_s} + 2\varphi_{B_{ri}}) \\ & + k_{ri} i_{ri} R l K \cos(\omega_s t - \theta_M + \varphi_{B_s} + \varphi_{B_s}) \end{aligned} \quad \text{II.22}$$

$$\text{Avec : } K = \frac{1}{4gJ\omega_s} \frac{\pi R l e}{\mu_0} k_s i_s k_{ri} i_{ri}$$

On peut résumer tous ces résultats à partir de ce qui suit :

En présence d'une barre rompue dans la cage rotorique, les circuits rotoriques engendrent un champ magnétique inverse de fréquence $-gfs$. Par conséquent, des courants à la fréquences $(1-2g)fs$ sont induits dans les circuits statoriques, accompagnés par une composante oscillatoire de fréquence $2gfs$ dans le couple électromagnétique. Cette dernière, provoque une oscillation dans la vitesse qui donne naissance à des nouvelles composantes de courant $(1\pm 2g)fs$ dans les circuits statoriques. Les harmoniques qui ont la même fréquence $(1-2g)fs$ s'ajoutent pour donner une seule composante résultante. Tandis que le courant de fréquence $(1+2g)fs$, circulant dans les enroulements statoriques, et en présence de défaut, induisent des courants de $\pm 3gfs$ au rotor. Par conséquent des courants de fréquence $(1\pm 4g)fs$ sont générés par un processus identique à celui qui produit les courants de fréquence $(1\pm 2g)fs$. [SAH 03]

II.4 Le choix des indicateurs pour la détection de cassures de barres :

D'après l'Etude effectuée dans [SAH 10] sur l'effet des ruptures de barres rotoriques sur les différents types d'harmoniques utilisant la visualisation linéaire du spectre du courant statoriques. On remarque que la plupart des harmoniques de type RSH diminuent légèrement en présence d'un défaut de barres tandis que les TH sont peu affectés à l'exception de fs et $11fs$ qui croissent considérablement et $13fs$ qui diminue notablement. Par contre, la majorité des amplitudes des harmoniques de type RBFH augmentent toujours suite à ce défaut et surtout ceux de fréquences $(1\pm 2kg)fs$ et $(5\pm 2kg)fs$, ce qui représente un bon indice pour les cassures de barres.

A la lumière de ces résultats, on va adopter, dans ce travail ceux dernières fréquences pour détecter la présence de ce défaut.

II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons Explorer le contenu spectral de courant statorique par la méthode d'analyse spectrale du courant statorique (MCSA-FFT) On trouve quatre types d'harmoniques qui sont toujours présents dans le spectre du courant statorique (RSH, TH, RBFH, EFH). On a fait un petit Etude analytique sur le défaut de cassures de barres. Enfin, on faire choisir les indicateurs de ce défaut.

Pour la détection de ce défaut on-line requérir de définir un algorithme qui permet de suivi ce défaut, Ce qui fera l'objet du troisième chapitre.

chapitre III
L'estimation spectrale
par la méthode de
STLSIP

III.1 Introduction :

Après avoir Explorer le contenu spectral du courant statorique nous avons présenté comment peut-on utiliser la méthode (MCSA-FFT) pour la détection des défauts dans les MAS et spécialement le défaut de cassures de barres en se basant sur certains harmoniques qui existe toujours dans les spectres du courant statorique. D'après la littérature, Il est évident que la technique FFT est la plus simple et la plus rapide pour analyser les spectres. Cependant, l'utilisation de cette technique est réservée strictement aux signaux stationnaires donc cette technique perd son efficacité face aux signaux non stationnaire. De plus, la FFT donne une seule information sur le défaut a suivi en utilisant un grand nombre des échantillons. Pour éviter ces handicaps, on peut utiliser la méthode STFT (Short Time Fourier Transform) ce qui a permet d'estimer et en plus de suivi de l'évolution des indicateurs de défaut en fonction du temps (on-line). Malgré les avantages de la STFT, elle reste nécessaire l'utilisation de large fenêtre pour qu'elle fonctionne précisément, puisque on doit trouver un compromis entre la résolution fréquentielle et la résolution temporelle qui sont contradictoires et elles dépendent de la longueur de la fenêtre glissante (pour avoir une bonne résolution fréquentielle, on doit utiliser au moins 10000 échantillons). Comme solution, nous allons proposer, dans ce chapitre, l'utilisation de STLSP (Short Time Least Square Prony) comme une méthode pour l'estimation et le suivi des indicateurs de défaut de cassures de barres. Par conséquent, l'objectif est le développement d'un algorithme dédié à l'estimation et le suivi en ligne des signatures spectrales de ce défaut.

III.2 Méthode de prony :

La méthode de Prony est une technique paramétrique de traitement de signal qui a été développé par **Gaspard de Prony** en 1795. Cependant, elle a connu un essor important seulement depuis 20 ans à cause de développement énorme des moyens de calcul. Elle fait donc l'objet de nombreuses publications présentant différentes variantes modernes de son algorithme primitif.

La méthode de Prony originale permet d'extraire le comportement sinusoïdal ou exponentiel d'un signal échantillonné en résolvant un ensemble d'équations linéaires issues d'un modèle mathématique du signal étudié. Donc, la méthode de Prony modélise la forme d'onde d'un signal échantillonné par une somme linéaire d'exponentielles complexes conjuguées.

Par exemple, supposons un signal $x[n]$ de N_e échantillons, la méthode de Prony classique rapproche l'ensemble des échantillons à une combinaison linéaire des fonctions exponentielles complexes. Cette combinaison représente l'expression du signal estimé $\hat{x}[n]$. [LAA18]

$$\hat{x}[n] = \sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-1} \quad \text{III. 1}$$

Avec $h_k = A_k e^{j\varphi_k}$ et $z_k = e^{(a_k + j2\pi f_k)T_s}$

Où p est l'ordre du modèle et T_s est la période d'échantillonnage.

Les paramètres du modèle : A_k , f_k , φ_k et a_k sont les inconnus à estimer. Ils représentent respectivement : l'amplitude, la fréquence, l'angle de phase et le coefficient d'amortissement caractérisant le $k^{\text{ième}}$ harmonique.

L'équation (III.1) est un problème non linéaire très difficile à résoudre. En utilisant l'analyse de Prony, ce problème non linéaire se transforme à la solution d'un système d'équations linéaires. Dans cette direction, on doit construire un ensemble des équations de différence linéaires homogènes avec des coefficients a_k constants (où : $a_0 = 1$) :

$$\sum_{k=0}^p a_k x[n-k] = 0 \quad \text{III. 2}$$

L'équation de différence linéaire (III.2) peut être exprimée sous la forme matricielle suivante :

$$\mathbf{X}\mathbf{A} = -\mathbf{Y} \quad \text{III. 3}$$

$$\text{Où : } \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x[p] & \cdots & x[1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x[2p-1] & \cdots & x[p] \end{bmatrix}; \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix}; \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} x[p+1] \\ \vdots \\ x[2p] \end{bmatrix}$$

Les paramètres a_k sont déterminés en résolvant l'équation (III.3). Ensuite, un polynôme caractéristique avec des racines z_k peut être formé en utilisant les paramètres a_k comme suit :

$$\mathbf{F}(z) = \sum_{k=0}^p a_k z^{p-k} \quad \text{III. 4}$$

Par conséquent, le coefficient d'amortissement et la fréquence peuvent être déduits directement à partir des racines z_k de polynôme (III.4) :

$$a_k = \frac{\ln|z_k|}{T_s} \quad \text{et} \quad f_k = \frac{1}{2\pi T_s} \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(z_k)}{\text{Re}(z_k)} \right]$$

Enfin, les racines z_k sont utilisées pour écrire les p équations de (III.1) sous une forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} & \cdots & \mathbf{1} \\ \mathbf{z}_1 & \mathbf{z}_2 & \cdots & \mathbf{z}_p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{z}_1^{p-1} & \mathbf{z}_2^{p-1} & \cdots & \mathbf{z}_p^{p-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{h}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(1) \\ \vdots \\ \mathbf{x}(p) \end{bmatrix} \quad \text{III. 5}$$

Les paramètres complexes h_k peuvent être déterminés en résolvant l'équation (III.5) et par conséquent, l'amplitude A_k et l'angle de phase φ_k peuvent être obtenus en utilisant les relations suivantes :

$$A_k = |h_k| \text{ et } \varphi_k = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(h_k)}{\text{Re}(h_k)} \right]$$

III.3 La Méthode de Prony Modifiée :

Il est important de noter que les performances de la méthode de Prony classique deviennent instables en présence de bruit. Cela est dû au fait qu'il n'y a aucune erreur considérée dans le modèle primitif. Cependant le signal réel est toujours noyé dans le bruit et pour prendre en considération cette situation, l'équation (III.1) devrait être modifiée comme suit : [SAH15, LAA18].

$$x[n] = \hat{x}[n] + \varepsilon[n] = \sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-1} + \varepsilon[n] \quad \text{III. 6}$$

Où $\varepsilon[n]$ représente l'erreur d'approximation entre le signal réel $x[n]$ et son approximation linéaire $\hat{x}[n]$. Le problème d'estimation de paramètre est basé donc sur la minimisation de l'erreur quadratique sur les N échantillons disponibles :

$$E = \sum_{n=1}^N |\varepsilon[n]|^2 = \sum_{n=1}^N |x[n] - \sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-1}|^2 \quad \text{III. 7}$$

Dans la pratique, le nombre des échantillons disponibles est supérieur au nombre des paramètres inconnus ($N > 2p$). Dans ce cas, l'équation aux différences linéaire (III.2) doit être modifiée comme suit :

$$\sum_{k=0}^p a_k x[n-k] = \varepsilon[n] \quad \text{III. 8}$$

Les N échantillons disponibles seront utilisés pour réécrire (III.8) sous une forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} x[p] & \cdots & x[1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x[N-1] & \cdots & x[N-p] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x[p+1] \\ \vdots \\ x[N] \end{bmatrix} \quad \text{III. 9}$$

Le vecteur des paramètres inconnus a_k est choisi pour minimiser l'erreur quadratique totale de prédiction linéaire. La minimisation peut être effectuée en utilisant la méthode des moindres carrés. En outre, l'estimation des paramètres complexes h_k est effectuée aussi par la méthode des moindres carrés. Dans ce cas, l'ensemble des équations linéaires (III.5) devrait être modifié sous la forme compacte suivante :

$$\mathbf{Z} \cdot \mathbf{H} = \mathbf{C} \quad \text{III. 10}$$

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} & \dots & \mathbf{1} \\ z_1 & z_2 & \dots & z_p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_p^{N-1} \end{bmatrix}; \mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_p \end{bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} x(1) \\ \vdots \\ x(N) \end{bmatrix} \quad \text{III. 11}$$

Par conséquent, la méthode de prony modifiée comporte les trois étapes suivantes :

Etape 1 :

La détermination des paramètres de prédiction linéaire a_k Cette étape est réalisée par la résolution de l'équation (III.9).

Etape 2 :

Trouver les racines z_k du polynôme caractéristique à partir de l'équation (III.4). Les racines z_k permettent la détermination de paramètres a_k et f_k .

Etape 3 :

Résoudre l'équation (III.10) par la méthode des moindres carrés ce qui permet la détermination des A_k et φ_k .

III.3.1 Test de la méthode de Prony :

On a appliqué la méthode de Prony sur un signal générique, Ce signal est défini comme suit :

$$X(t) = 10.\sin(2.\pi.50.t) + 5.\sin(2.\pi.45.t) + 3.\sin(2.\pi.55.t)$$

Le nombre des échantillons : $N_e = 15$ échantillons.

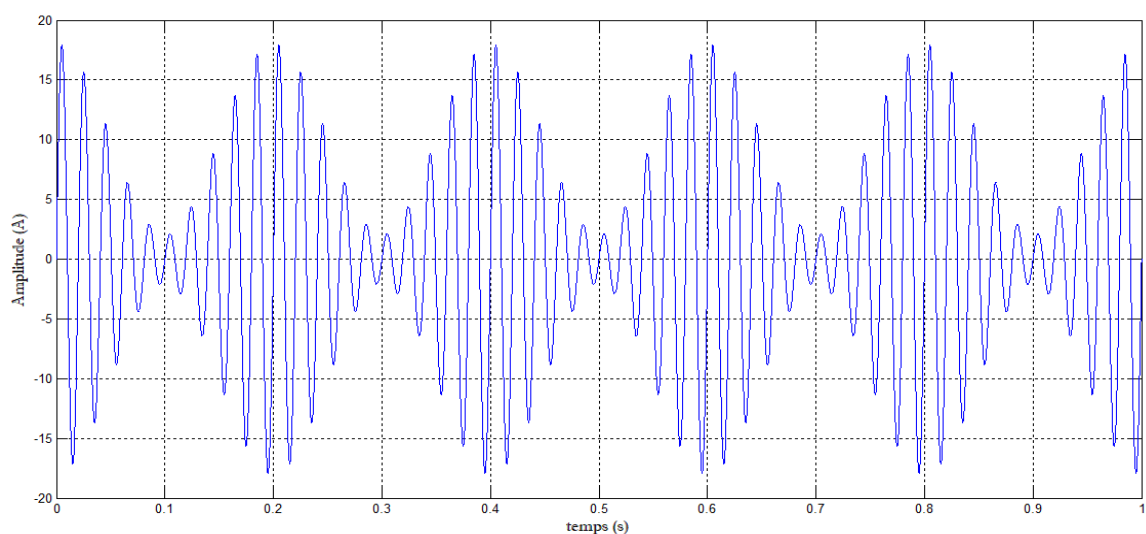


Fig. III. 1 L'allure temporelle du signal multi harmoniques génère.

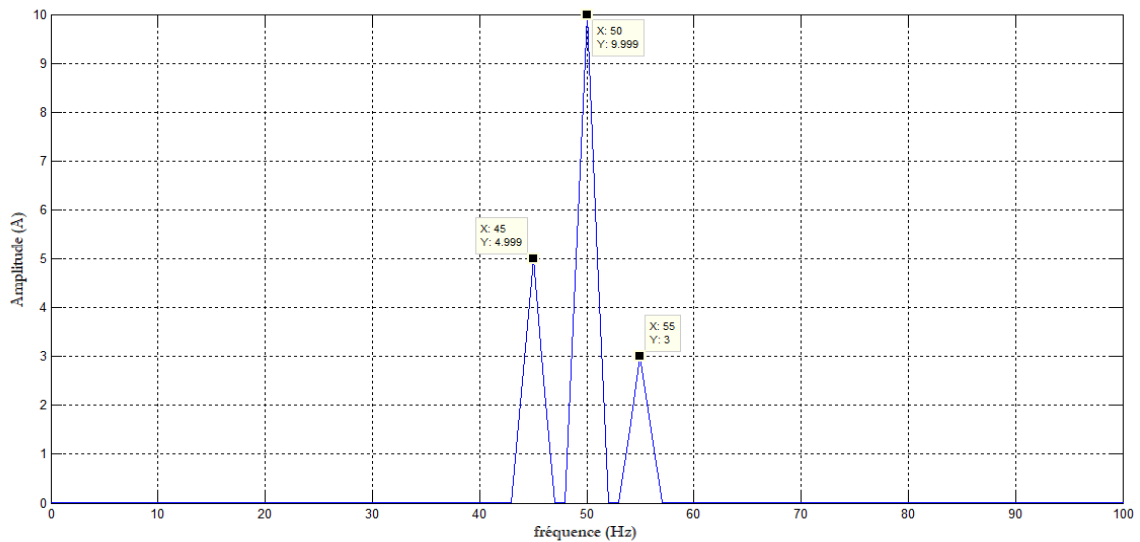


Fig. III. 2 Spectre du signal généré.

	Valeur réelle	Valeur estimée par méthode de PRONY	Valeur estimée par méthode de FFT
Amplitude	A1 = 10 ; A2 = 5 ; A3 = 3	A1 = 10 ; A2 = 5 ; A3 = 3	A1 = 9.999 ; A2 = 4.999 ; A3 = 3
Fréquence	F1 = 50 ; F2 = 45 ; F3 = 55	F1 = 50 ; F2 = 45 ; F3 = 55	F1 = 50 ; F2 = 45 ; F3 = 55
Nombre des échantillons utilisés		15	10000

Tableau III. 1 Les résultats obtenus par l'application des méthodes : Prony et FFT.

On remarque que la méthode de Prony est besoin seulement de 15 échantillons pour qu'elle donne des résultats comparables (et avec plus de précision) à ceux obtenus par la FFT qui nécessite au moins 10000 échantillons.

III.4 La Méthode de Prony à fenêtre glissante STLSP :

Il est important de noter L'application de l'algorithme de Prony, donne une seule information sur l'amplitude et la fréquence des harmoniques quel que soit le nombre des échantillons. Alors que, l'objectif est l'estimation et le suivi continue de ces grandeurs. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé d'appliquer l'algorithme de la méthode STLSP (Short Time Least Square Prony's Method).

Cette méthode consiste à subdiviser le signal en plusieurs fenêtres de petites tailles ; et chaque fenêtre sera analysée par la méthode de Prony. [SAH15, LAA18]

III.4.1 Ajustement de la Méthode de STLSP :

Il est très important de noter que l'efficacité et la précision de la méthode de Prony dépendent de plusieurs facteurs. Pour cela, on doit prendre en compte les paramètres suivants :

- **Le choix de la taille de la fenêtre :** c'est une tâche critique. En effet, l'augmentation de la taille de la fenêtre améliore la précision des résultats d'une part mais d'une autre part, elle augmente le temps de calcul. On doit donc trouver un compromis entre la rapidité et la précision.
- **Le pas de déplacement de la fenêtre :** elle a une grande influence sur la résolution temporelle. En fait, un pas très petit, permet de suivre les variations brusques qui peuvent se manifester lors de l'acquisition du signal.
- **Le Choix de l'ordre du modèle (p) :** La choix correcte de p peut être considérée comme une tâche critique ; en fait, un ordre de modèle plus petit que le nombre d'harmoniques recherchées entraîne de grandes erreurs sur l'estimation des harmoniques. Cependant, l'augmentation de l'ordre du modèle peut améliorer la précision de l'estimation, mais elle entraîne un long temps de calcul et produit de nombreux faux harmoniques. D'après [SAH 15], p doit être aussi petit que possible mais supérieur au double du nombre d'harmoniques à estimer n_h . Donc, l'ordre du modèle est défini comme suit : $p = 2 \cdot n_h + 1$
- **De plus** le nombre d'harmoniques à estimer n_h , le Nombre d'échantillons utilisés (N_e), la nature du signal a traités (stationnaire ou non) et la fréquence d'échantillonnage, tous affectent la qualité et la précision des résultats. [LAA18]

III.4.2 Teste de la méthode STLSP :

Nous allons tester l'efficacité de la méthode STLSP pour un signal généré multi harmoniques non stationnaires. Pour cela, nous avons généré un signal multi-harmoniques contenant une non stationnarité comme suivant :

$$X(t) = A1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F1 \cdot t) + A2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F2 \cdot t) + A3 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F3 \cdot t)$$

Où les amplitudes et les fréquences prennent les valeurs $A1 = 10$; $A2 = 5$; $A3 = 3$ [A]; $F1 = 50$; $F2 = 45$; $F3 = 55$ [Hz] dans l'intervalle du temps [0 s à 0.5 s]. Puis $A1 = 7$; $A2 = 3$; $A3 = 1$ [A]; $F1 = 51$; $F2 = 42$; $F3 = 58$ [Hz] dans l'intervalle [0.5 s à 1 s].

Dans ce cas, et puisque on a trois harmoniques à estimer, l'ordre du modèle est choisi : $p = 7$.

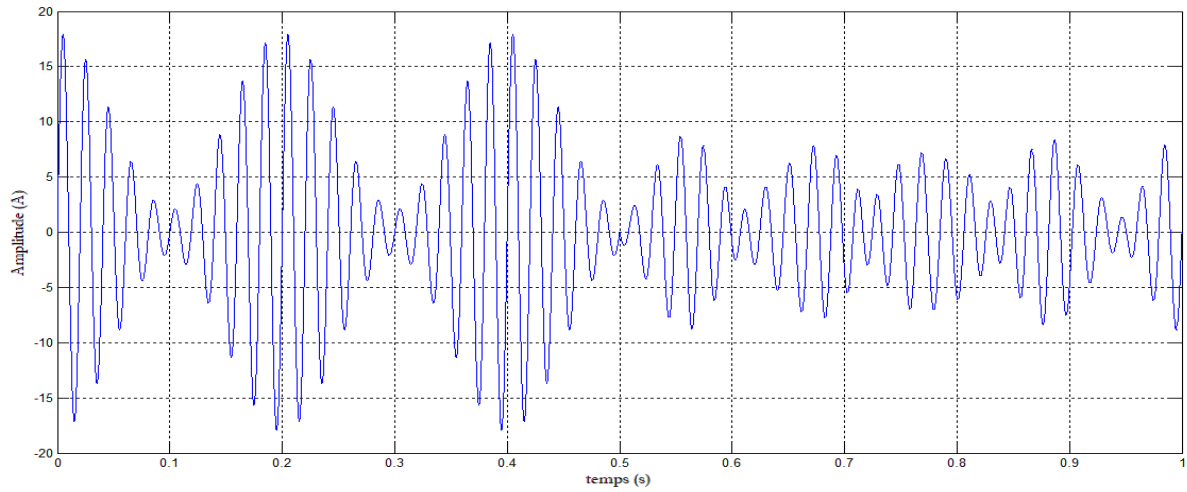


Fig. III. 3 L'allure temporelle du signal non stationnaire généré.

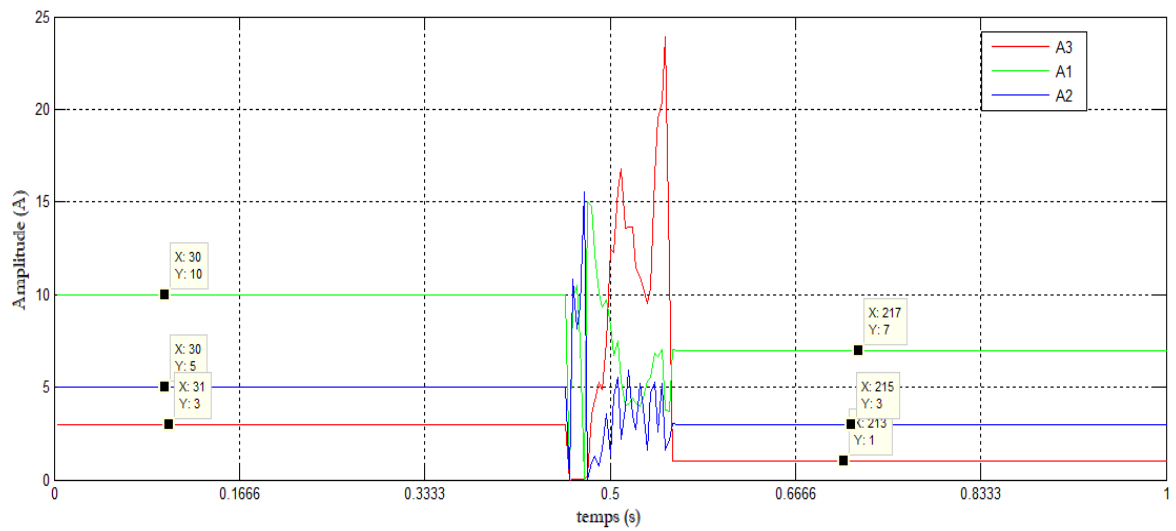


Fig. III. 4 Les amplitudes estimées par la méthode de STLSP.

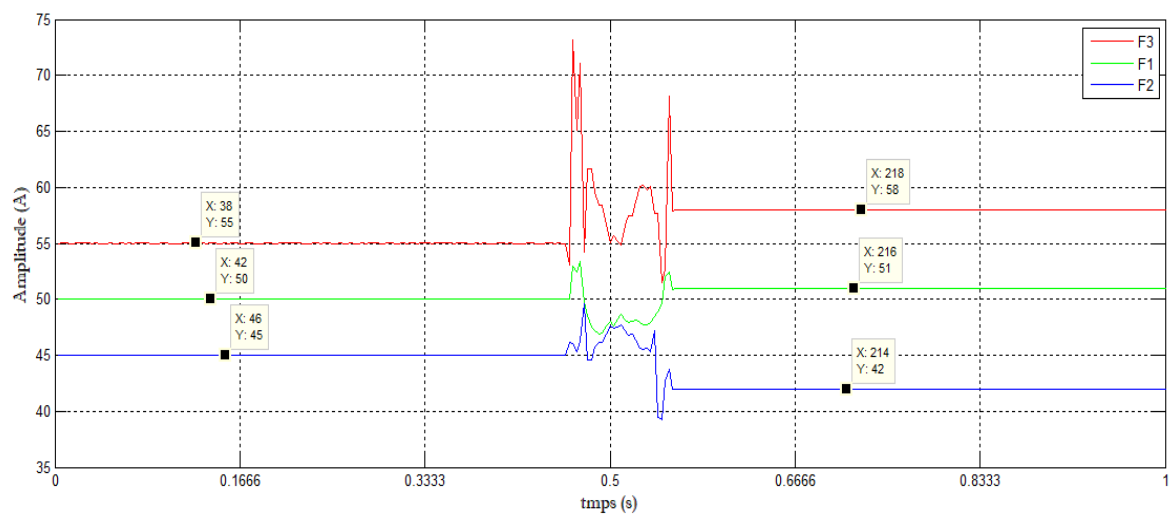


Fig. III. 5 Les fréquences estimées par la méthode de STLSP.

Selon les **Fig. III.4** et **Fig. III.5**, il est clairement visible que l'estimation et le suivi de la fréquence et l'amplitude de l'harmonique cible sont bien vérifiées. Ce résultat confirme que la STLSP a l'aptitude d'estimer et de suivre les fréquences et les amplitudes des harmoniques même pour les signaux non stationnaires.

III.5 Détection de défaut de cassures de barres par la méthode STLSP :

On a démontré précédemment dans ce chapitre que la méthode STLSP permet de fournir des informations continues sur les fréquences et les amplitudes de tout harmoniques constituant un signal quelconque, ce qui convient bien à notre application.

La **Fig. III.6** montre un schéma descriptif des étapes à suivre lors de l'application de la méthode STLSP pour l'estimation des indicateurs de défaut de cassures de barres. Les signaux des courants statoriques sont d'abord préparés (Data Preprocessing) par filtrage, sous-échantillonnage et suppression des composantes spectrales continues non désirées. Ensuite, les signaux obtenus après le « Data Preprocessing » sont divisés en plusieurs fenêtres de courtes durées. Puis, chacune est analysée par la STLSP, ce qui permet une estimation continue des amplitudes et fréquences correspondantes aux harmoniques représentant les signatures de défaut de cassure de barres.

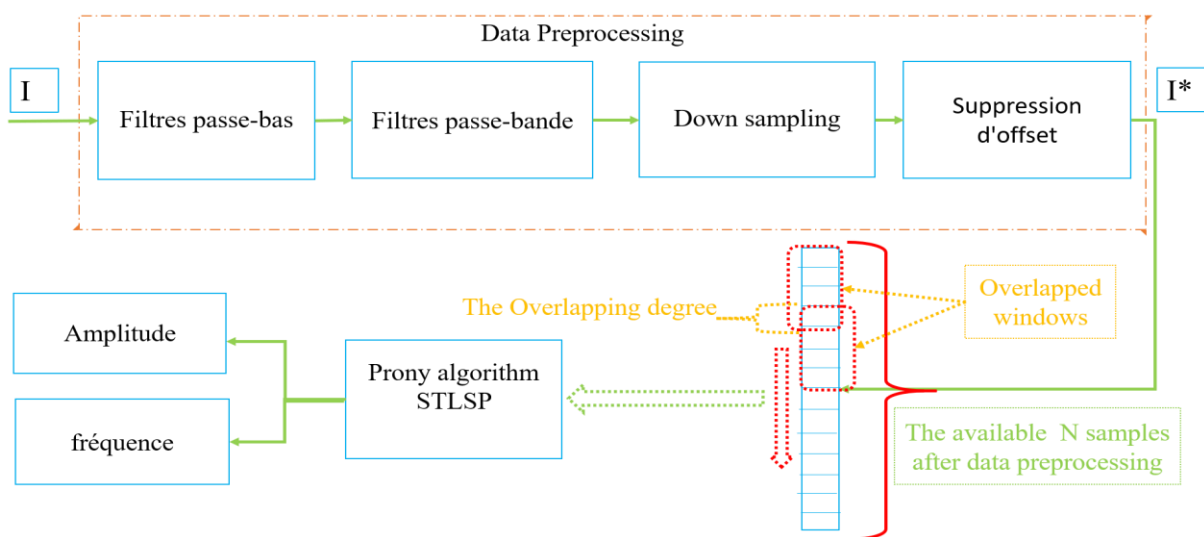


Fig. III. 6 Schéma descriptif de l'application de la STLSP.

III.5.1 Banc d'essai :

Dans notre travail, On a exploité les résultats du banc d'essai qui a été effectué dans le laboratoire de Génie Electrique de Biskra (LGEB) pour valider notre algorithme. L'acquisition des courants nous permet d'appliquer la technique de la STLSP afin de détecter le défaut de la cassure de barres en comparant avec l'état sain de la machine asynchrone. [SAH10]

Les constituants principaux du banc d'essai sont :

- Une MAS à rotor à cage d'écureuil : tétra polaire de 3 kW (voir *annexe A*).
- Une charge résistive variable.
- Une carte en temps réel DSPACE DS1104.
- Instruments de mesure : des capteurs de tension, de courant et de couple.

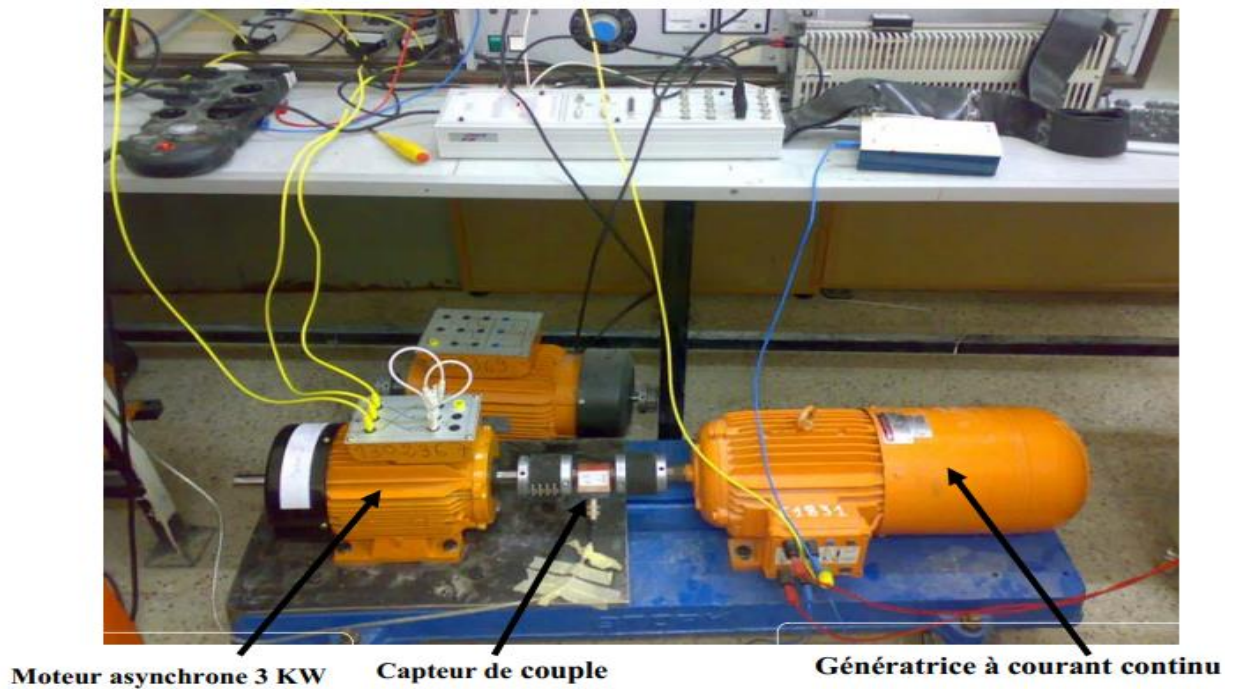


Fig. III. 7 Le banc d'essai expérimental.

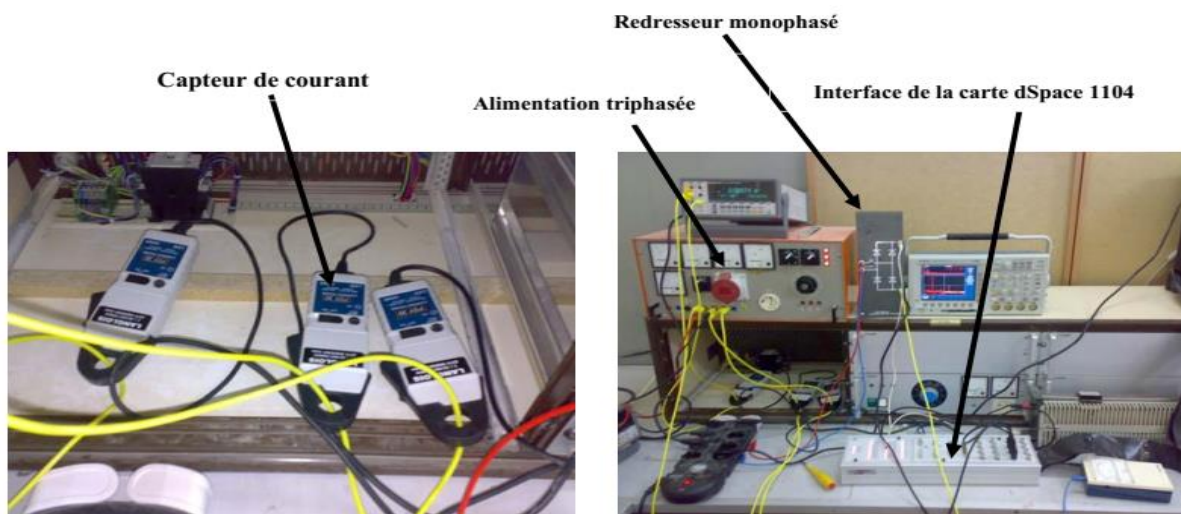


Fig. III. 8 Instruments utilisés pour le Banc d'essai.

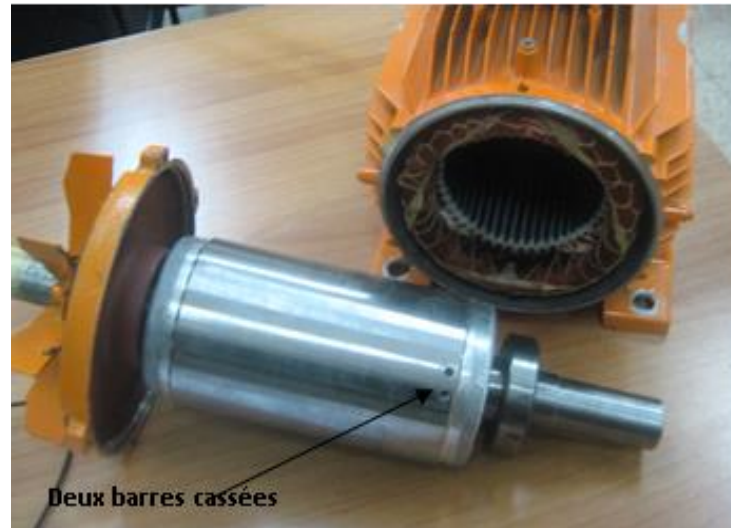


Fig. III. 9 rotor du moteur 3kW avec deux barres cassées.

III.5.2 Les indicateurs des défauts rotoriques :

Pour prendre une décision sur l'état d'une machine asynchrone à cage, l'opérateur de diagnostic doit suivre l'évolution de certains indicateurs de défauts. Dans notre cas, on a étudié le défaut des ruptures de barres dans la cage rotorique. Nous avons démontré que ce type de défaut se manifeste par l'apparition des composantes spectrales appelée **RBFH** dont les fréquences sont données par la relation (II.8). Comme il existe une infinité des signatures pour ce défaut, il est possible également de définir une infinité des indicateurs pour ce défauts, mais on va limiter cette étude seulement sur les indicateurs suivants :

Les indicateurs	Les formules
Ind ₁	$\text{Ind}_1 = A_{(1-2g)fs}$
Ind ₂	$\text{Ind}_2 = A_{(1+2g)fs}$
Ind ₃	$\text{Ind}_3 = \frac{A_{(1+2g)fs}}{A_{fs}}$
Ind ₄	$\text{Ind}_4 = \frac{\text{Ind}_1 + \text{Ind}_2}{A_{fs}}$

Tableau III. 2 Les indicateurs de défaut.

A_{fs} : Amplitude de la fréquence fondamentale fs .

$A_{(1-2g)f_s}$: Amplitude de l'harmonique de fréquence $(1-2g)f_s$.

$A_{(1+2g)f_s}$: Amplitude de l'harmonique de fréquence $(1+2g)f_s$.

III.5.3 Validation de la méthode STLSP et Résultats :

III.5.3.1 L'état sain :

A) Pleine charge :

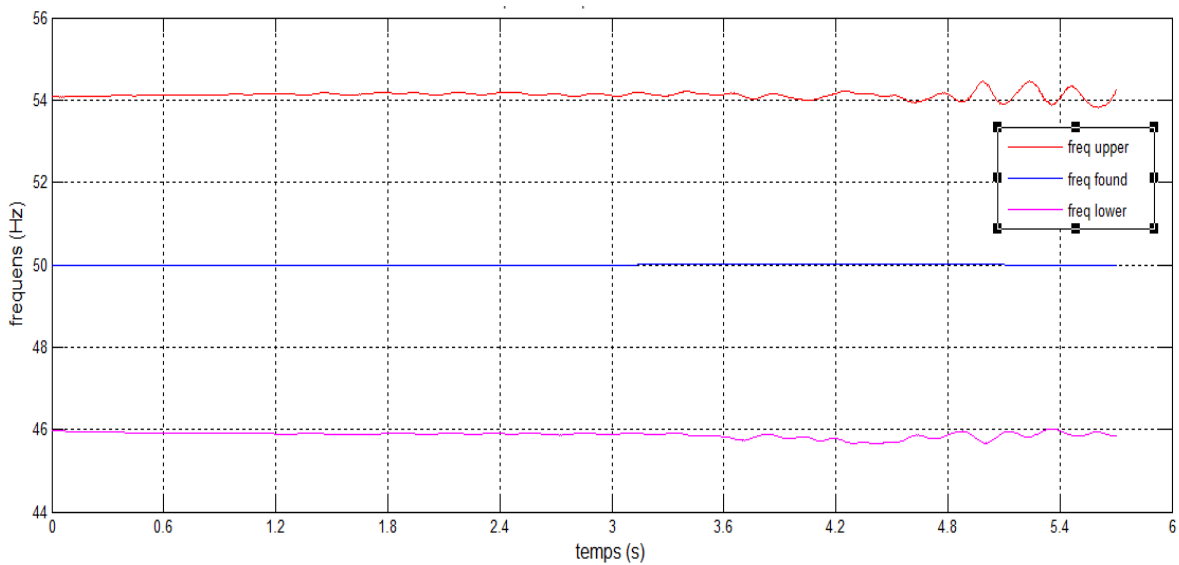


Fig. III. 10 Les fréquences autour du fondamental pour l'état sain en Pleine charge.

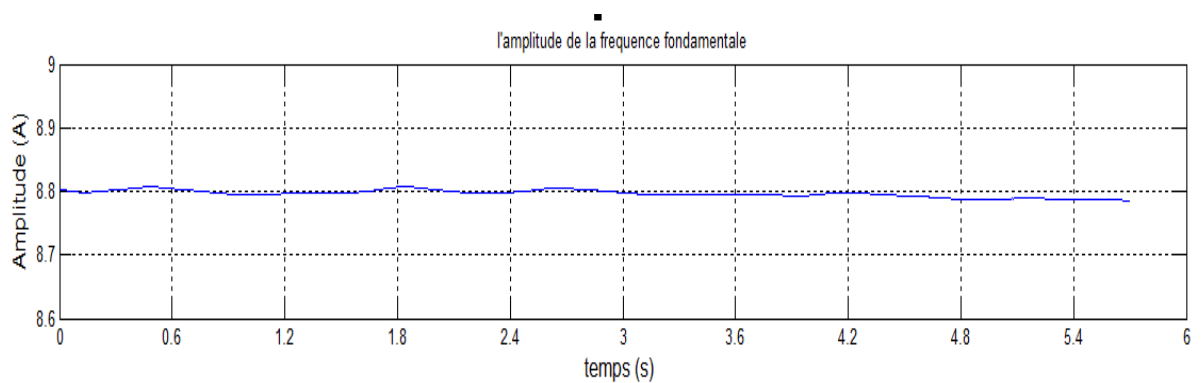


Fig. III. 11 L'amplitude de la fondamentale pour l'état sain en Pleine charge.

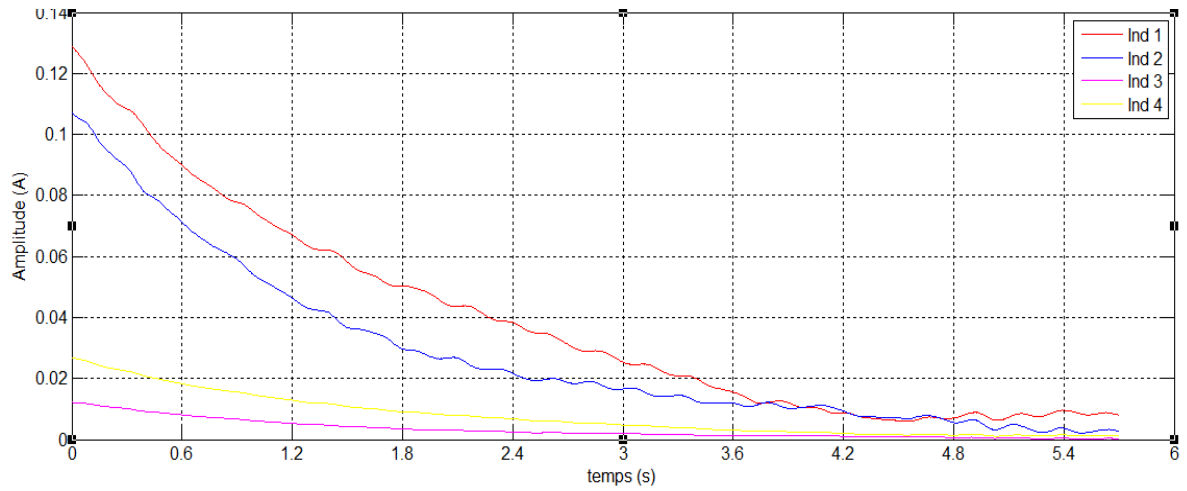


Fig. III. 12 Les indicateurs des défauts rotoriques pour l'état sain en Pleine charge.

B) Moyen charge :

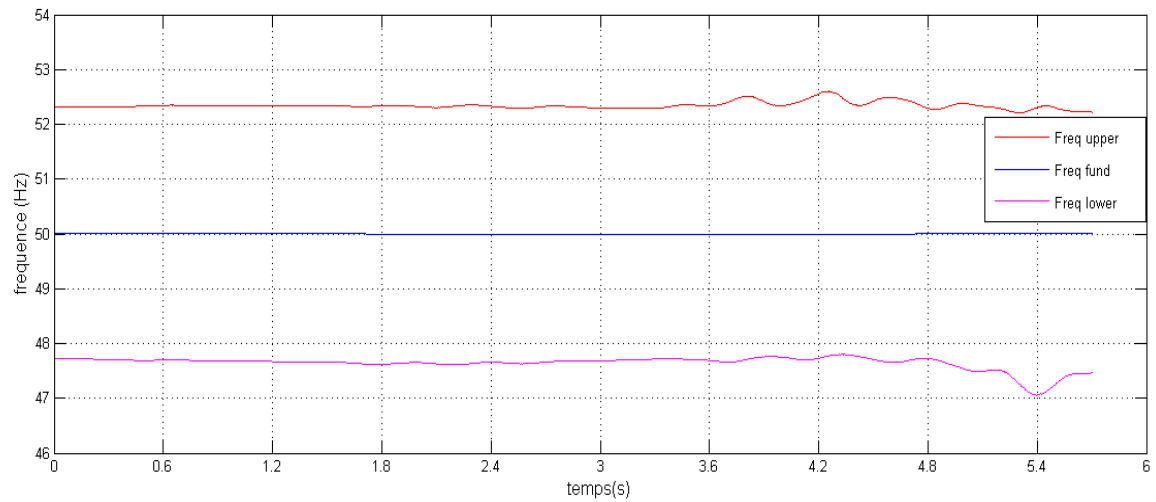


Fig. III. 13 Les fréquences autour du fondamental pour l'état sain en moyen charge.

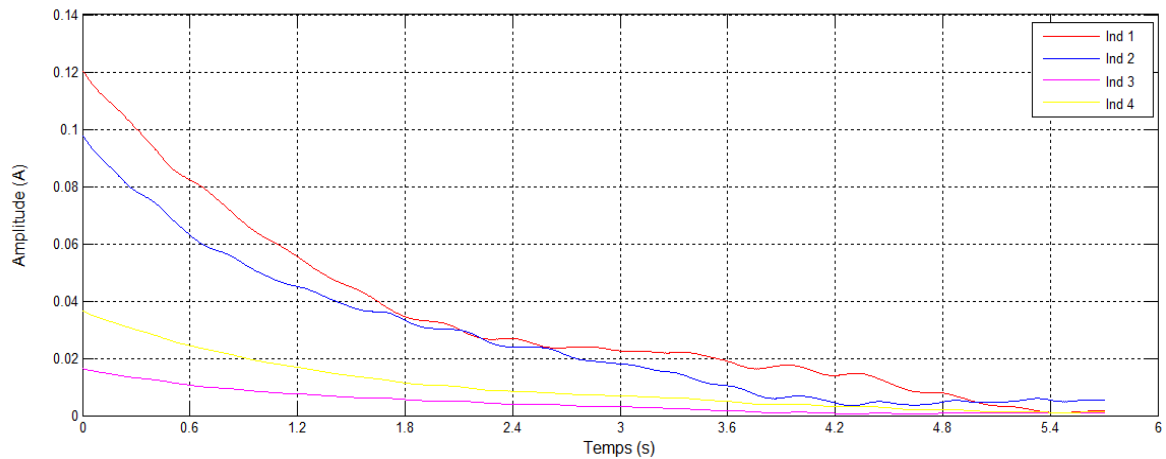


Fig. III. 14 Les indicateurs des défauts rotoriques pour l'état sain en moyen charge.

C) Faible charge :

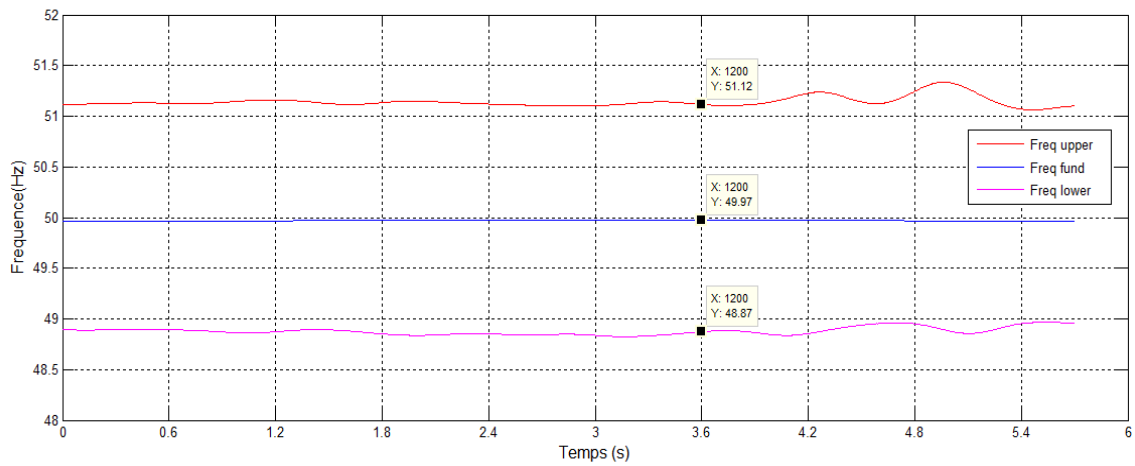


Fig. III. 15 Les fréquences autour du fondamental pour l'état sain en faible charge.

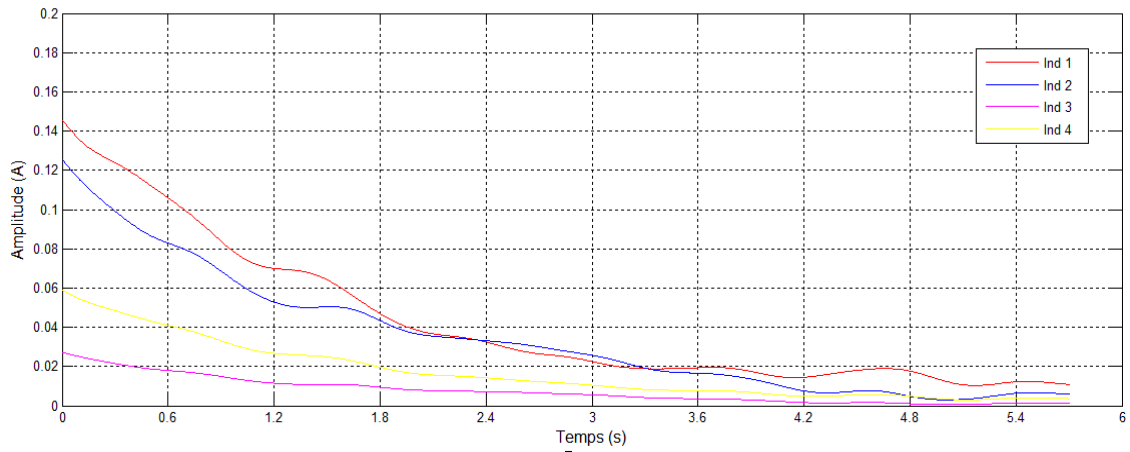


Fig. III. 16 Les indicateurs des défauts rotoriques pour l'état sain en faible charge.

III.5.3.2 Moteur avec défaut (1 barre cassée) :

A) Pleine charge :

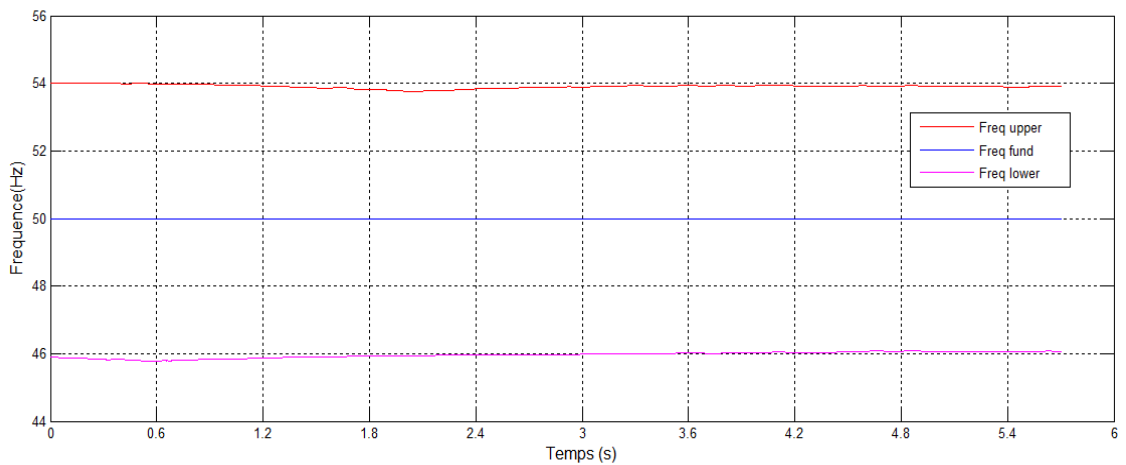


Fig. III. 17 Les fréquences autour du fondamental, moteur en pleine charge avec 1 bc.

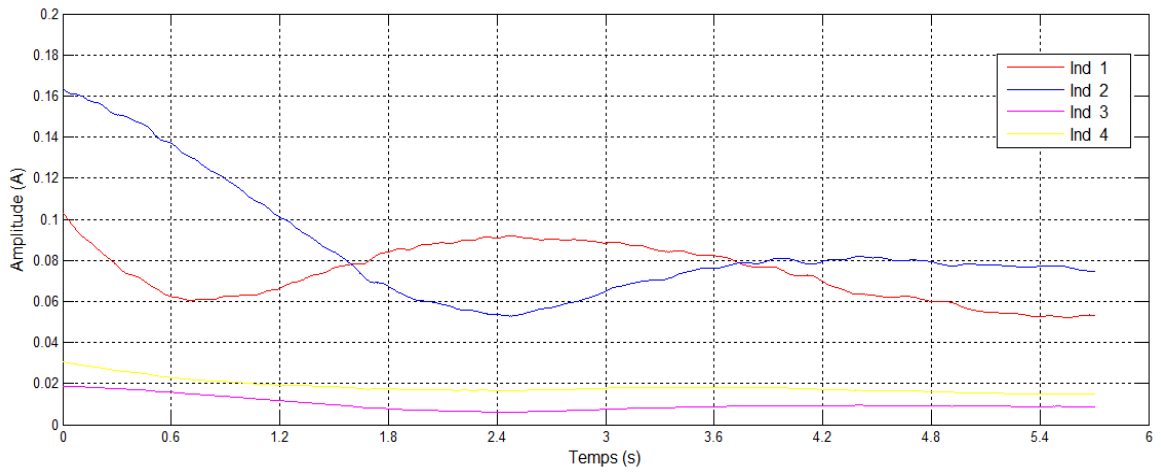


Fig. III. 18 Les indicateurs des défauts rotoriques, moteur en pleine charge avec 1 bc.

B) Moyen charge :

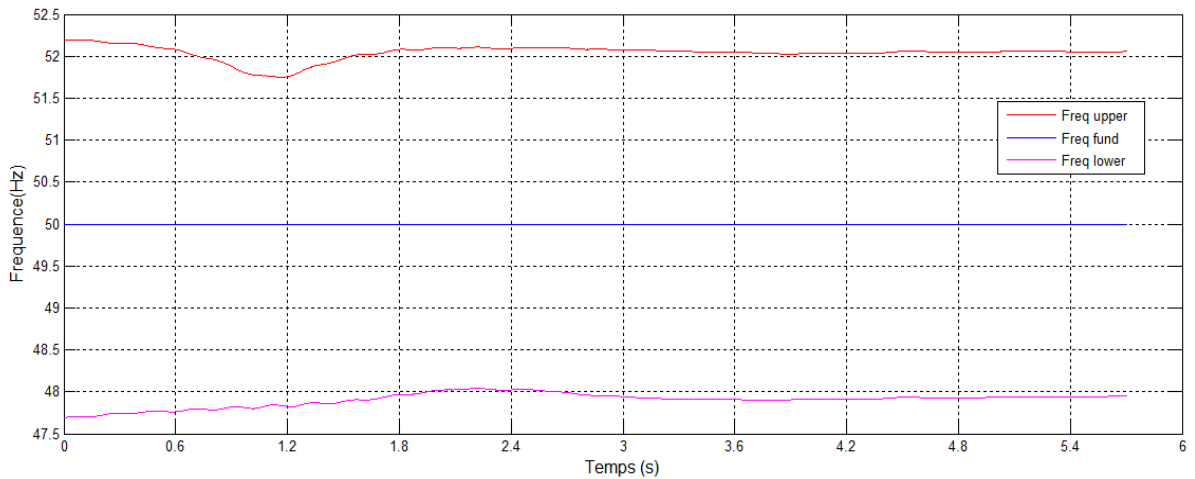


Fig. III. 19 Les fréquences autour du fondamental, moteur en moyen charge avec 1 bc.

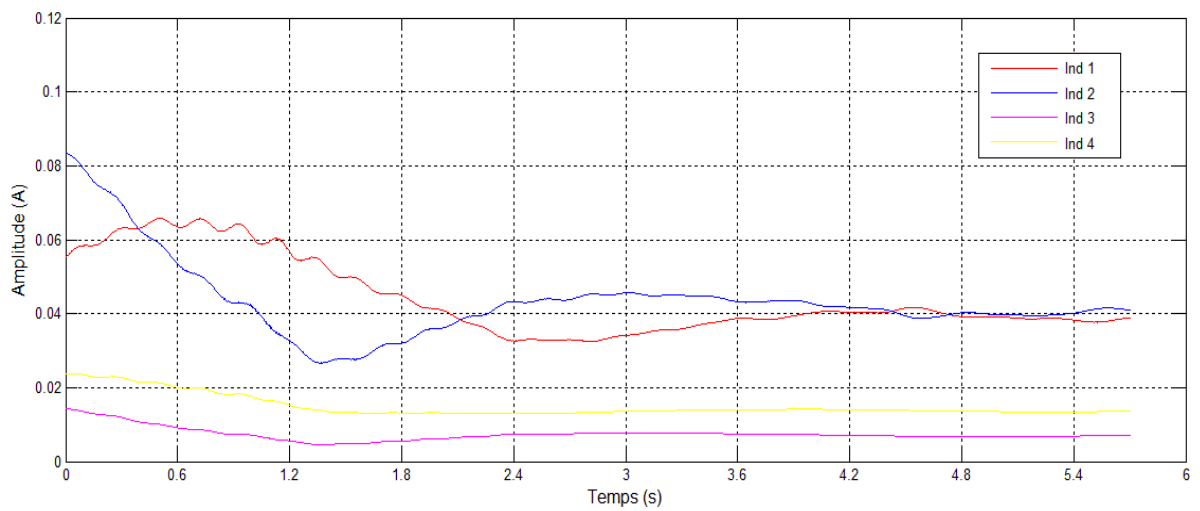


Fig. III. 20 Les indicateurs des défauts rotoriques, moteur en moyen charge avec 1 bc.

C) Faible charge :

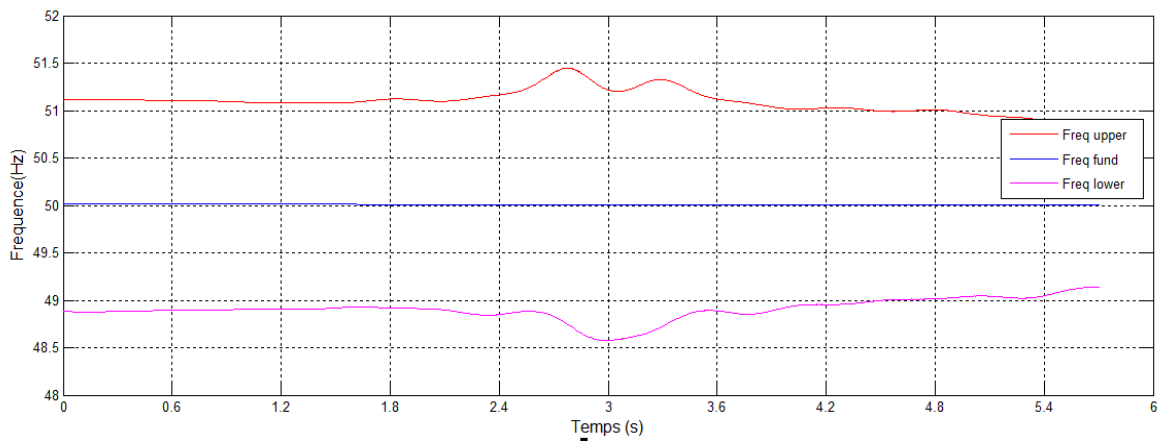


Fig. III. 21 Les fréquences autour du fondamental, moteur en faible charge avec 1 bc.

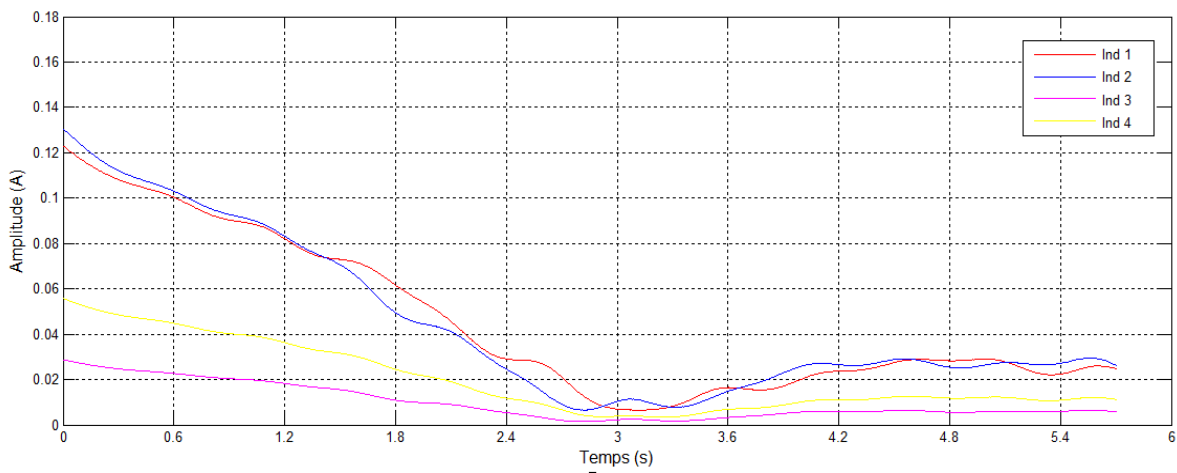


Fig. III. 22 Les indicateurs des défauts rotoriques, moteur en faible charge avec 1 bc.

III.5.3.3 Moteur avec défaut (2 barre cassée) :

A) Pleine charge :

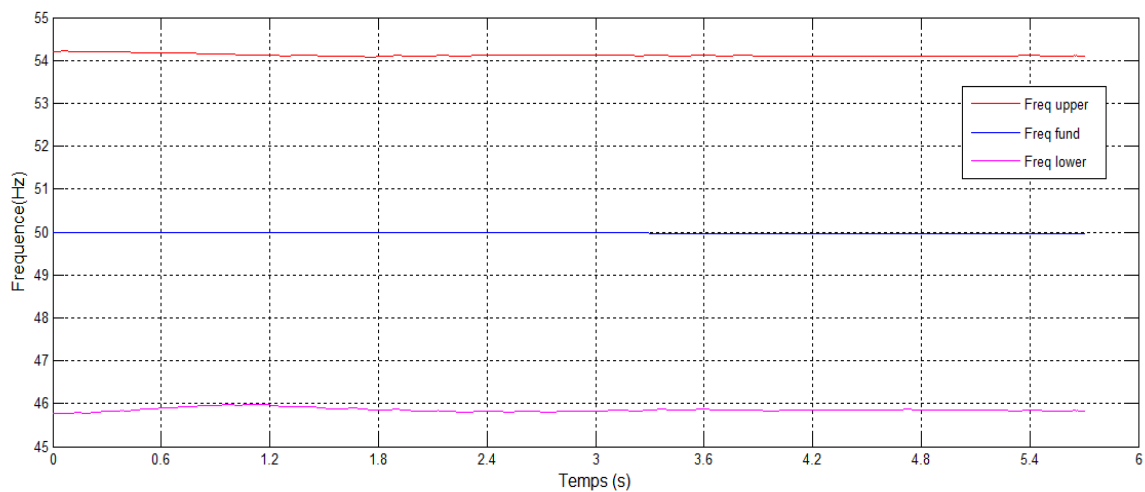


Fig. III. 23 Les fréquences autour du fondamental, moteur en pleine charge avec 2 bc.

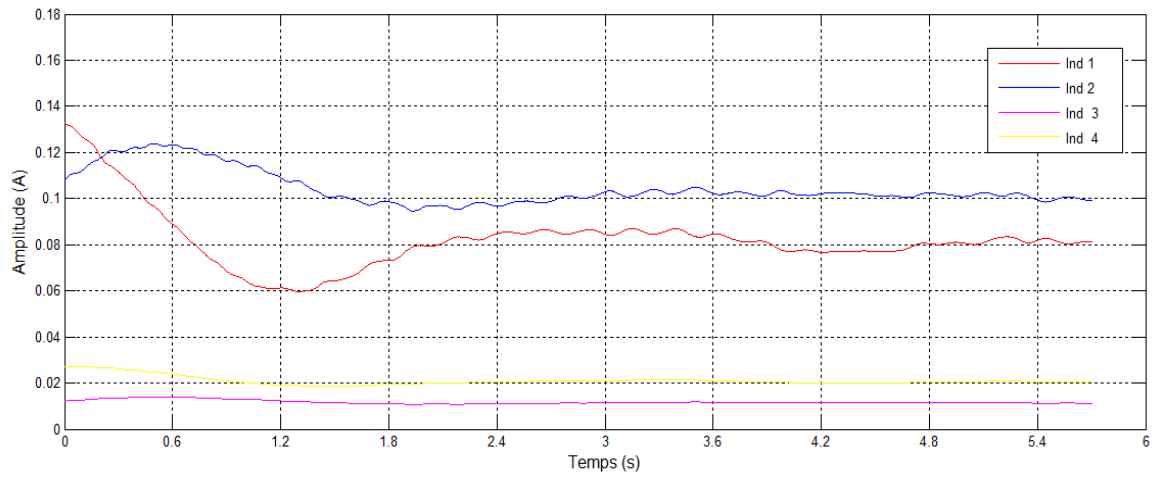


Fig. III. 24 Les indicateurs des défauts rotoriques, moteur en pleine charge avec 2 bc.

B) Moyen charge :

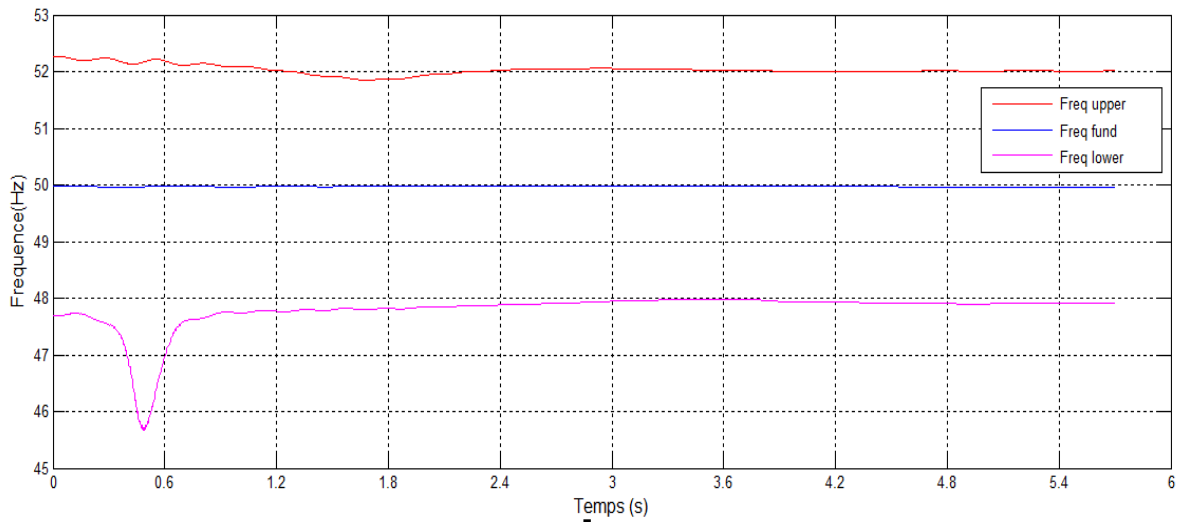


Fig. III. 25 Les fréquences autour du fondamental, moteur en moyen charge avec 2 bc.

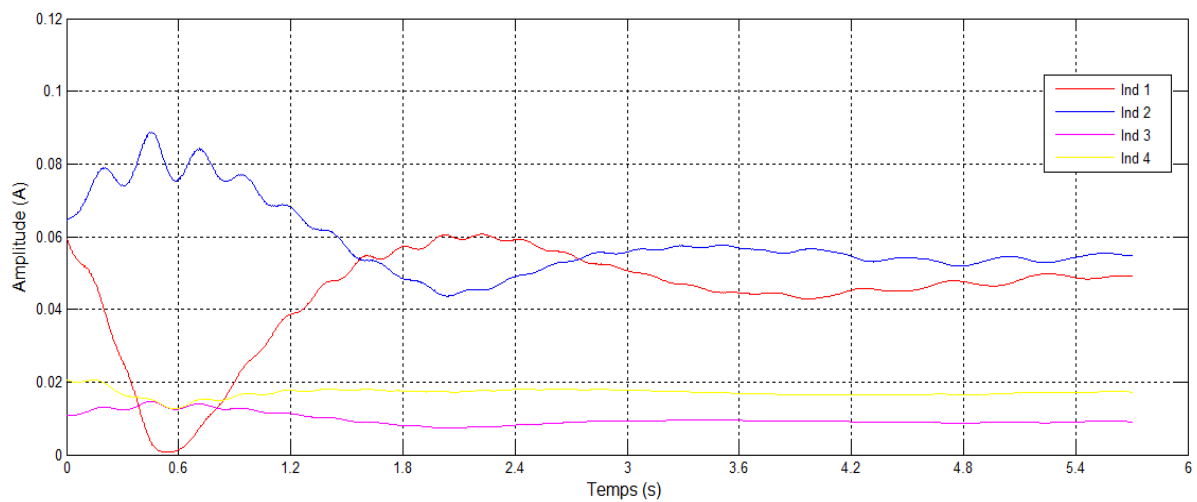


Fig. III. 26 Les indicateurs des défauts rotoriques, moteur en moyen charge avec 2 bc.

III.5.3.4 Faible charge :

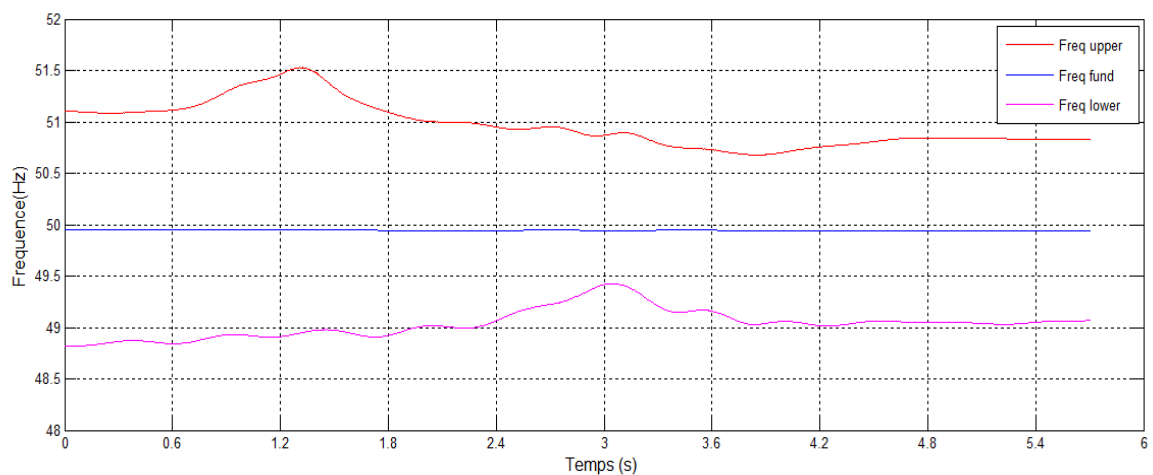


Fig. III. 27 Les fréquences autour du fondamental, moteur en faible charge avec 2 bc.

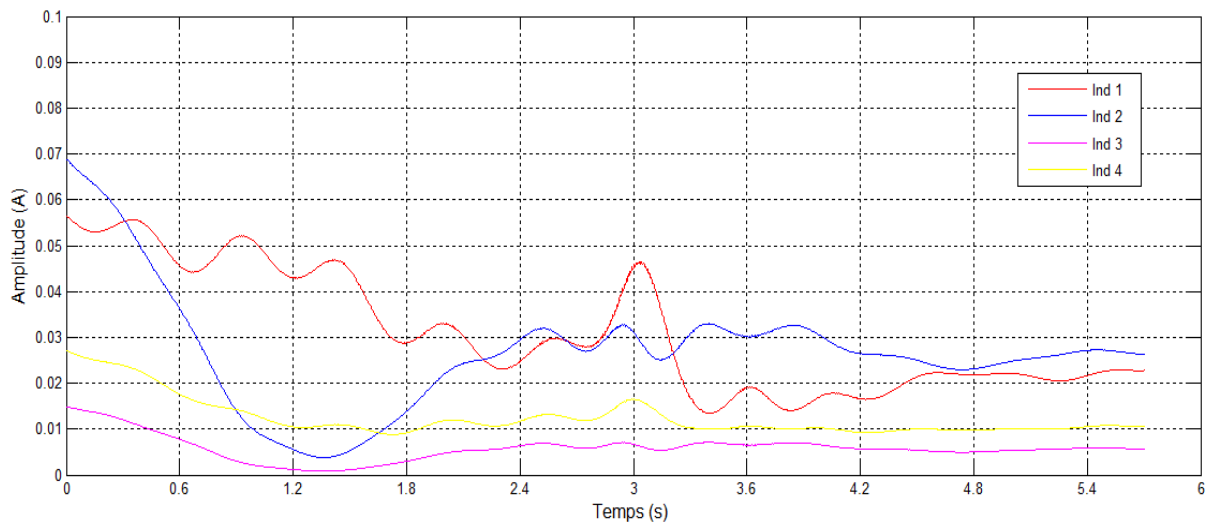


Fig. III. 28 Les indicateurs des défauts rotoriques, moteur en faible charge avec 2 bc.

Les tableaux suivants résument l'influences du défaut de barres sur les quatre indicateurs :

Les indicateurs	Les fréquences			Les amplitudes		
	État sain	1 bc	2 bc	État sain	1 bc	2 bc
Ind1	45.83	46.02	45.87	0.00702	0.06	0.0805
Ind2	54.14	53.93	54.12	0.00559	0.07928	0.1025
Ind3				0.00063	0.00913	0.0115
Ind4				0.00143	0.01605	0.0206

Tableau III. 3 Les indicateurs de défaut de cassure du barres rotoriques en pleine charge.

Les indicateurs	Les fréquences			Les amplitude		
	État sain	1 bc	2 bc	État sain	1 bc	2 bc
Ind ₁	47.69	47.91	47.97	0.00787	0.0392	0.0476
Ind ₂	52.33	52.02	52.03	0.00469	0.04021	0.0518
Ind ₃				0.00078	0.00688	0.0086
Ind ₄				0.0021	0.01359	0.0165

Tableau III. 4 Les indicateurs de défaut de cassure du barres rotoriques en moyen charge.

Les indicateurs	Les fréquences			Les amplitude		
	État sain	1 bc	2 bc	État sain	1 bc	2 bc
Ind ₁	48.87	48.89	49.05	0.01775	0.02825	0.0218
Ind ₂	51.12	51.12	50.85	0.00486	0.02543	0.0231
Ind ₃				0.00105	0.00558	0.0049
Ind ₄				0.0049	0.01178	0.0097

Tableau III. 5 Les indicateurs de défaut de cassure du barres rotoriques en faible charge.

III.5.4 Remarques et interprétations :

D'après les résultats obtenus dans les figures et les tableaux :

- L'application de la STLSP sur le signal de courant statorique permet d'estimer les fréquences et les amplitudes correspondantes aux harmoniques recherchés. En utilisant une fenêtre glissante de seulement 100 échantillons.
- On peut facilement remarquer l'apparition des harmoniques recherchés, dont les fréquences sont identiques à celles créés par ce défaut (rupture de barres) et même à l'état sain, mais avec des amplitudes faibles.
- Les amplitudes des indicateurs appartenant au défaut des ruptures de barres augmentent sensiblement suite à la présence d'un défaut dans la cage rotorique et cette augmentation dépend de la sévérité de ce défaut.
- Les tableaux ci-dessus montre que la présence d'un défaut de cassures de barres influe d'une manière différente sur tous les indicateurs définis précédemment. La variation dans les amplitudes de ces indicateurs dépendant de plusieurs facteurs tels que : la sévérité du défaut et le régime de fonctionnement.

Cependant, on peut dire que le taux d'augmentation diffère d'un indicateur à un autre et automatiquement d'un moteur à un autre, ceci rend difficile de choisir les indicateurs les plus sensibles sur lesquelles on doit se baser pour détecter la présence de défaut.

Mais on peut prendre en compte les trois critères suivants : Sensibilité à l'apparition du défaut, Sensibilité à la sévérité du défaut, Sensibilité au régime de fonctionnement. Pour faire une comparaison entre les indicateurs :

Les indicateurs	La charge	L'indice de comparaison (%)	
		1 bc	2 bc
Ind ₁	20%	59.15	22.92
	50%	398.09	504.82
	100%	754.7	1046.72
Ind ₂	20%	423.25	376.13
	50%	757.35	1006.39
	100%	1318.24	1733.63
Ind ₃	20%	431.42	375.23
	50%	782.05	1005.12
	100%	1349.2	1736.5
Ind ₄	20%	140.4	97.95
	50%	547.14	687.61
	100%	1022.37	1344.75

Tableau III. 6 L'indice de comparaison.

$$\text{L'indice de comparaison} = 100 * \frac{\text{Etat avec défaut} - \text{Etat sain}}{\text{Etat sain}}$$

Les indices **Ind₁** est le moins sensibles à la présence du défaut pour tous les régimes de fonctionnement. De plus, il a une réaction très faible en fonction de la sévérité du défaut.

Les indices **Ind₂**, **Ind₃**, **Ind₄** augmentent sensiblement est d'une manière régulière en fonction de la sévérité de défaut pour tous les régimes de fonctionnement. De plus, ils ont une bonne réaction en fonction de la sévérité du défaut (sauf en faible charge avec 2 bc qui a de mauvais résultat).

On remarque que **Ind2**, **Ind3** et **Ind4** sont les indices les plus stables lorsqu'on passe d'un régime à un autre.

Les indicateurs des défauts dans la cage rotorique peuvent être classés selon l'ordre suivant :

- 1) **Ind3**
- 2) **Ind2**
- 3) **Ind4**

Nous avons constaté qu'il n'existe pas un indicateur qui satisfait tous les critères d'une façon parfaite.

III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté l'application de la méthode STLSP (Short Time Least Square Prony's Method) dédiée à l'estimation et le suivi des indicateurs de défaut de cassures de barre. L'algorithme de cette méthode est basé sur l'application de la méthode de Prony modifié à fenêtre glissante. On a expliqué la base théorique de cette méthode.

Pour valider notre algorithme on a utilisé les résultats de banc d'essais qui a été effectué dans le laboratoire de Génie Electrique de Biskra (LGEB). Une description des différentes parties de ce banc d'essai a été présentée. D'abord, on a défini quelques indicateurs de défauts. Puis on a fait des tests pour tester l'efficacité de la méthode proposée à l'état sain et avec défaut. Les résultats obtenus confirment l'efficacité de la méthode proposée (STLSP) pour l'estimation et le suivi des indicateurs de défaut de cassures de barre. Nous avons démontré également que cet algorithme nécessite un petit nombre d'échantillons pour obtenir des résultats précis de l'estimation des indicateurs de ce défaut. Cela réduit considérablement les besoins de stockage et le temps de calcul ce qui facilite son implantation en ligne.

Conclusion
Générale

Conclusion Générale

Le travail qui a été présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil. Nous avons montré que les principaux éléments de la machine asynchrone peuvent présenter des défaillances totales ou partielles provoquant un arrêt inattendu, qui conduit à des pertes économiques considérables. Pour éviter ces problèmes, il est impératif de mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats.

Dans ce travail on a proposé une méthode pour la détection de défaut de cassure de barres rotoriques dont l'objectif principal est le développement d'un algorithme permettant l'estimation et le suivi en ligne des signatures spectrales de ce défaut, en utilisant la méthode de Prony modifiée à fenêtre glissante (Short Time Least Square Prony's Method « STLSP »).

Au début de ce travail, nous avons rappelé quelques définitions de base concernant la maintenance et le diagnostic. Ensuite, nous présentons brièvement la constitution de la MAS à cage. Ainsi que les différents types des défauts qui peuvent affecter la machine et leurs origines. En fin, un panorama sur les méthodes utilisées dans le diagnostic des défauts de la machine a été présenté.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié le contenu spectral du courant statoriques du moteur asynchrone triphasé à cage. A travers ces études, on a montré la richesse de ce dernier en harmoniques, tel que les TH, les RSH, les EFH et RBFH. Nous avons démontré également que ces quatre types d'harmoniques sont toujours présents dans le spectre du courant statoriques même à l'état sain. On a fait également une étude analytique sur le défaut de cassures de barres.

Dans le dernier chapitre, premièrement, nous avons présenté notre algorithme qui utilise la méthode STLSP. On a exposé avec détail la méthode proposée ainsi que son application pour la détection de défaut de cassures de barres rotoriques. Afin de mettre en œuvre cette stratégie, nous avons défini quelques indicateurs de défauts. Finalement, on a fait des tests, sous différentes conditions de fonctionnement à l'état sain et avec défaut, pour valider notre algorithme et évaluer l'efficacité de cette méthode proposée.

Les résultats obtenus sont encourageants. Ils sont confirmés l'efficacité de la méthode proposée (STLSP) pour l'estimation et le suivi des indicateurs de défaut de cassures de barres rotoriques.

En perspective, nous proposons d'implémenter la méthode STLSP on-line pour tester son efficacité expérimentalement. Ainsi, on peut appliquer cette méthode pour le diagnostic d'autres types des défauts dans la machine asynchrone, tel que les défauts statoriques et défaut d'excentricité.

Paramètres de la machine utilisée

Caractéristiques	Moteur asynchrone triphasés
Fabricant	Leroy sommaire
La puissance	3 kW
La vitesse nominale	1430 tr/min
La tension nominale	380 V
Le courant nominale	6.40 A
Nombre de barres rotoriques	28

Tableau A.1. Caractéristiques de la machine utilisée

Bibliographie

[AME18] : AMEID Tarek « Contrôle et Diagnostic de la Machine à Induction » Thèse de doctorat, département Electrotechnique Biskra, 2018.

[BES16] : BESSAM Besma « Analyse et détection des défauts dans la machine asynchrone à base des techniques intelligentes », Thèse de doctorat, département d'électrotechnique, Université de Biskra, 2016.

[BES17] : BESSOUS Noureddine « Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Asynchrones : Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation », Thèse de doctorat, département d'électrotechnique, Université de Biskra, 2017.

[HAL15] : HALEM Noura « Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis », Thèse de doctorat, département d'électrotechnique, Université de Biskra, 2015.

[GHO05] : A. Ghouggal, « Diagnostic de la machine asynchrone triphasée : modèle dédié à la détection des défauts » mémoire de magister, Université de Batna 2005.

[KEC17] : KECHIDA Ridha « Contrôle et diagnostic d'une machine à induction sans capteur en utilisant des techniques avancées d'analyse et de traitement », Thèse de doctorat, département d'électrotechnique, Université de Biskra, 2017.

[LAA18] : LAADJAL, Khaled, « Contribution au diagnostic des défauts dans les condensateurs électrolytiques : Applications aux convertisseurs DC-DC », Thèse de doctorat, département Electrotechnique Biskra, 2018.

[MEN07] : A. Menacer, « Contribution à l'identification des paramètres et des états d'une machine à induction pour diagnostic et développement de commande robuste : robustesse vis-à-vis de défauts », thèse de doctorat, université de Batna, Décembre 2007.

[SAH03] : SAHRAOUI, Mohamed, "Contribution aux diagnostics d'un machine asynchrone triphasée à cage" Université Mohamed Khider Biskra, 2003.

[SAH10] : SAHRAOUI, Mohamed, « Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones », Thèse de doctorat, département d'électrotechnique, Université de Biskra, 2010.

[SAH 15]: Sahraoui, M, Cardoso, A. J. M, and Ghoggal, A, "The use of a modified Prony's method to track the broken rotor bars characteristic frequencies and amplitudes, in three-phase induction motors," IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 51, No. 3, pp. 2136– 2147, May/Jun. 2015.

[YAH12] : YAHIA, Khaled, « Contribution au diagnostic de la Machin Asynchrone Triphasée par une Approche Signal », Thèse de doctorat, département d'électrotechnique, Université de Biskra, 2012.