

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de la Technologie

Mémoire de Fin d'Études
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Technologie
Filière : Génie Électrique
Spécialité : Machines Électriques

Thème

*Etude et simulation de défaut rotorique
dans le moteur asynchrone*

Réalisé par :

OUAKOUAK Riadh

NECIRA Karim

Encadré par :

Dr. HALEM Noura

Soutenu en Juin 2023

Remerciements

Avant tous nous remercions « ALLAH » 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 Dr. HALEM Noura , pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils et ses remarques. Nous remercions également les membres de jury d'avoir accepté et d'examiner ce travail. Nous n'oublions pas de remercier tous les enseignants qui ont contribués durant notre formation. Enfin nous voudrions associer à nos remerciements toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

الإهداء

أهدي هذا العمل المتواضع

لأمي بكل حبي.

إلى والدي بكل امتناني.

إلى إخواني وأخواتي.

إلى عائلتي.

جميع أصدقائي.

Sommaire

Remerciement	
Dédicaces	
Sommaire	I
Liste des Figures	II
Liste des Tableaux	III
Notations et symboles	V
Introduction générale	01
Conclusion générale	45
Chapitre 1 : État de l'art	
1.1 Introduction	2
1.2 Définition de la machine asynchrone triphasée	2
1.2.1 Constitution de la machine asynchrone triphasée	3
1.2.1.1 Stator	3
1.2.1.2 Rotor	3
1.2.1.2.1 Rotor bobiné	3
1.2.1.2.2 Rotor à cage d'écureuil	4
1.2.1.3 Les paliers	5
1.2.1.4 Principe de fonctionnement	5
1.3 Types de défauts dans la machine asynchrone triphasée	5
1.3.1 Les défauts statoriques	5
1.3.2 Roulements à billes	6
1.3.3 Les défauts rotoriques	6
1.3.4 Conséquences	7
1.4 Rupture de barres rotoriques	8
1.4.1 Rupture de portion d'anneau	8
1.5 Méthodes de détection des défauts dans la machine asynchrone	8
1.5.1 Définition et objectif du diagnostic	8
1.5.2 Méthodes de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone	9

1.5.2.1 Les méthodes de connaissance	10
1.5.2.2 Les méthodes de redondances analytiques	10
1.5.2.3 Méthodes de traitement des signaux	10
1.6 Modèle de la machine asynchrone	11
1.6.1 Approche analytique	12
1.6.2 Approche numérique	12
1.6.2.2 La méthode des réseaux de perméance	12
1.6.2.3 La méthode des éléments finis	12
1.7 Conclusion	13
Chapitre 2 : Modèle réduit de la machine asynchrone triphasée à cage issu du modèle multi enroulements	
2.1 Introduction	14
2.3 Modèle réduit équivalent de la machine	15
2.3.1 Introduction	15
2.3.2 Transformation de Clarke généralisée	15
2.3.3 Modèle réduit	16
2.4 Simulation du modèle réduit issu du modèle multi enroulements	18
2.4.1 État sain	18
2.4.2 État de défaut de cassure de barres	19
2.4.3 État de défaut, faible charge	20
2.4.4 État de défaut, moyenne charge	22
2.4.5 État de défaut, forte charge	25
2.5 Conclusion	27
Chapitre 3 : Analyse spectrale des résultats de simulation et expérimentaux	
3.1 Introduction	28
3.2 Moyenne charge	28
3.3 Forte charge	32
3.4 Signaux expérimentaux	35
3.4.1 État sain	36
3.4.2 État de défaut, une barre cassée, moyenne charge	37
3.4.3 État de défaut, une barre cassée forte charge	40

3.4.4 État de défaut, deux barres cassées, moyenne charge	42
3.4.5 Forte charge, deux barres cassées	43
3.5 Conclusion	44

Listes des figures

Chapitre 1	
Figure 1.1 Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage	2
Figure 1.2 Stator d'une machine asynchrone	3
Figure 1.3 Rotor bobiné	4
Figure 1.4 Rotor à cage d'écureuil d'une machine asynchrone	4
Figure 1.5 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage	5
Figure 1.6 Roulements à billes	6
Figure 1.7 Excentricité statique et dynamique	7
Figure 1.8 Les étapes du diagnostic	9
Figure 1.9 Méthodes de diagnostic de la machine asynchrone	9
Chapitre 2	
Figure 2.2 Schéma de simulation	18
Figure 2.3 Courant statorique, état sain	18
Figure 2.4 Vitesse de rotation angulaire, état sain	19
Figure 2.5 Couple électromagnétique, état sain	19
Figure 2.6 Courant statorique, état de défaut	20
Figure 2.7 Zoom du courant statorique, état de défaut	20
Figure 2.8 Vitesse de rotation angulaire, état de défaut	21
Figure 2.9 Zoom de la vitesse de rotation angulaire, état de défaut	21
Figure 2.10 Couple électromagnétique, état de défaut	22
Figure 2.11 Zoom du couple électromagnétique, état de défaut	22
Figure 2.12 Courant statorique, état de défaut, moyenne charge	23
Figure 2.13 Zoom du courant statorique, état de défaut, moyenne charge	23
Figure 2.14 Vitesse de rotation angulaire, état de défaut, moyenne charge	23
Figure 2.15 Zoom de la vitesse de rotation angulaire, état de défaut, moyenne charge	24

Figure 2.16 Couple électromagnétique, état de défaut, moyenne charge	24
Figure 2.17 Zoom du couple électromagnétique, état de défaut, moyenne charge	24
Figure 2.18 Courant statorique, état de défaut, forte charge	25
Figure 2.19 Zoom du courant statorique, état de défaut, forte charge	25
Figure 2.20 Vitesse de rotation angulaire, état de défaut, forte charge	26
Figure 2.21 Zoom de la vitesse de rotation angulaire, état de défaut, forte charge	26
Figure 2.22 Couple électromagnétique, état de défaut, forte charge	26
Figure 2.23 Zoom du couple électromagnétique, état de défaut, forte charge	27
Chapitre 3	
Figures 3.1 spectre de ia : échelle linéaire, état de défaut	28
Figures 3.2 spectre de ia : échelle en db, état de défaut	29
Figures 3.3 spectre de la vitesse wm : échelle linéaire, état de défaut	29
Figures 3.4 spectre de la vitesse wm : échelle en db, état de défaut	29
Figures 3.5 Spectre du couple électromagnétique : échelle en linéaire, état de défaut	30
Figures 3.6 Spectre du couple électromagnétique : échelle en db, état de défaut	30
Figures 3.7 Spectre du courant ids : échelle linéaire, état de défaut	30
Figures 3.8 Spectre du courant ids : échelle en db, état de défaut	31
Figures 3.9 spectre de ia : échelle linéaire, état de défaut	32
Figures 3.10 spectre de ia : échelle en db, état de défaut	33
Figures 3.11 spectre de la vitesse wm : échelle linéaire, état de défaut	33
Figures 3.12 spectre de la vitesse wm : échelle en db, état de défaut	33
Figures 3.13 Spectre du couple électromagnétique : échelle en linéaire, état de défaut	34
Figures 3.14 Spectre du couple électromagnétique : échelle en db, état de défaut	34
Figures 3.15 Spectre du courant ids : échelle linéaire, état de défaut	34
Figures 3.16 Spectre du courant ids : échelle en db, état de défaut	35
Figures 3.17 Spectre du courant statorique expérimental, moyenne charge, état sain, échelle linéaire	38
Figures 3.18 Spectre du courant statorique expérimental, moyenne charge, état sain, échelle en db	38
Figures 3.19 Tension statorique expérimentale, moyenne charge, état de défaut	37
Figures 3.20 Zoom de la tension statorique expérimentale, moyenne charge, état de défaut	37

Figures 3.21 Courant statorique expérimental, moyenne charge, état de défaut	38
Figures 3.22 Zoom du courant statorique expérimental, moyenne charge, état de défaut	38
Figures 3.23 Spectre du courant statorique expérimental, moyenne charge, échelle linéaire, état de défaut	39
Figures 3.24 Spectre du courant statorique expérimental, moyenne charge, échelle en db, état de défaut	39
Figures 3.25 Courant statorique expérimental, forte charge, état de défaut	40
Figures 3.26 Zoom du courant statorique expérimental, forte charge, état de défaut	40
Figures 3.27 Spectre du courant statorique expérimental, forte charge, échelle linéaire, état de défaut	41
Figures 3.28 Spectre du courant statorique expérimental, forte charge, échelle en db, état de défaut	41
Figures 3.29 Spectre du courant statorique expérimental, moyenne charge, échelle linéaire, état de défaut	42
Figures 3.30 Spectre du courant statorique expérimental, moyenne charge, échelle en db, état de défaut	42
Figures 3.31 Spectre du courant statorique expérimental, moyenne charge, échelle linéaire, état de défaut	43
Figures 3.32 Spectre du courant statorique expérimental, moyenne charge, échelle en db, état de défaut	43

Liste des tableaux

Liste des tableaux	
Tableau 1.1 Signatures spectrales des défauts de la machine asynchrone à cage	11
Tableau 1	32
Tableau 2	32
Tableau 3	44

NOTATIONS et SYMBOLES

	Notations Et Symboles
a, b, c	Indice correspondent aux trois phases (a,b,c).
s, r	Indice relatif au stator et rotor respectivement
O	Indice relatif au stator et rotor respectivement.
D	Indice de l'axe direct.
Q	Indice de l'axe quadrature.
Op	Polaire au longitudinal.
Oq	Interpolaire on transversale.
X	Ce sont des variables statoriques ou rotoriques : tension, courant ou flux.
O	Indice de l'axe homopolaire.
Ia, ib, ic	Courants des phases statoriques [A].
va, vb, vc	Tensions des phases statoriques [V].
ids, iqs	Composantes biphasées directe et en quadrature du courant statorique[A].
Φ	Flux magnétique.
L_{as}	Inductance propre d'une phase du stator.
M_{as}	Inductance mutuelle entre deux phases du stator.
L_{ar}	Inductance propre d'une phase du rotor.
M_{sr}	Inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor.
j_s	Flux magnétique par pôle créé par le courant statorique [Wb].
M_{ar}	Inductance mutuelle entre deux phases du rotor.
Θ_r	position du rotor [rd].
Θ_s	Position des grandeurs statoriques [rd].
[P]	Matrice de transformation de Park.
R_s	Résistance de l'enroulement statorique [%].
R_r	Résistance de l'enroulement rotorique [%].
ω_{dq}	Vitesse de rotation du repère (d,q) par rapport au stator.
ω_r	Vitesse de rotation du rotor par rapport au stator.
R_e	Résistance totale de l'anneau de court-circuit [%].
s,r	Indices stator et rotor, respectivement
P	Puissance [W].
B	Induction magnétique [T].

ϕ_r	Flux rotorique [Wb].
ϕ_s	Flux statorique [Wb].
P	Nombre de paires de pôles.
J	Moment d'inertie du système.
Cr	Couple résistant.
F	Couple résistant.
Cem	Coefficient de frottement visqueux.
B	Induction magnétique.
K'	une barre cassée.
R_{fdr}	la matrice résistance réduite.
R_{fdr}	la matrice inductance réduite.
R_{rfdq}	les termes des barres en défaut.

Introduction générale

Introduction générale

Aujourd'hui, la suprématie de la machine asynchrone dans presque dans tous les domaines industriels est incontestable. La machine est simple à construire, elle est robuste, son utilisation est facile, elle nécessite un minimum d'entretien et son coût d'achat est abordable. Tous ces facteurs lui ont permis de prendre une place prépondérante dans le marché industriel.

Cependant quoi qu'aussi robuste, elle ne peut échapper à certaines défaillances qui peuvent croître et qui risquent après un certain temps de l'endommager partiellement ou la mener à la panne totale.

Pourtant pour éviter ces situations fâcheuses, des méthodes de détection et de diagnostic ont pris naissance. Ces méthodes ont pour objectif la détection précoce des défauts dès leur naissance. Dans ce contexte, on nous a chargés d'étudier le modèle réduit qui découle du modèle multi enroulements afin de déceler les défauts de cassure de barres rotoriques.

Pour ce but le mémoire est divisé en trois chapitres.

Le premier chapitre est l'état de l'art dans lequel nous rappelons les principaux défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone à cage ainsi que leurs origines. Ensuite nous présenterons les différentes techniques de détection et de diagnostic des machines asynchrones.

Dans le deuxième le modèle réduit a été tiré de plusieurs thèses de doctorats et simulé. Les résultats dans le domaine temporel pour les différentes grandeurs sont satisfaisants pour les états sain et défaillant.

Dans le troisième chapitre les signaux sont traités grâce à l'analyse spectrale par le biais de la transformée de Fourier rapide TFR ou FFT en anglais. Les résultats obtenus sont très satisfaisants, concluants et sont conformes à ceux de la littérature. Nous avons terminé le chapitre par l'analyse spectrale d'un courant statorique expérimental pour différentes charges.

Enfin le mémoire est clôturé par une conclusion générale.

CHAPITRE 1

État de l'art

Chapitre 1

État de l'art

1.1 Introduction

A cause de leur robustesse, leur simplicité de construction et leur bas prix, les moteurs à induction à cage sont les plus utilisés et par conséquent occupent une place distinguée dans tous les secteurs industriels. Bien que robustes qu'ils soient, ils subissent au cours de leur fonctionnement des anomalies externes ou internes qui peuvent leur provoquer des défaillances, c'est pourquoi les industriels sont toujours en quête de solutions protectrices pouvant leur épargner des pannes soudaines et inattendues et par suite, éviter des pertes économiques considérables. Dans ce chapitre, on va montrer les constitutifs de la machine, des définitions qui concernent le diagnostic et tout ce que s'y rapporte, puis on va énumérer les défauts pouvant toucher la machine asynchrone à cage et leurs origines et enfin on va passer en revue plusieurs techniques de diagnostic utilisées.

1.2 Définition de la machine asynchrone triphasée

La machine asynchrone (figure 1.1) comporte un stator muni d'un enroulement triphasé et d'un rotor portant un enroulement triphasé ou une cage. C'est un transformateur à champ tournant dont le primaire est le stator et dont le secondaire, mis en court-circuit et libre de tourner [1].

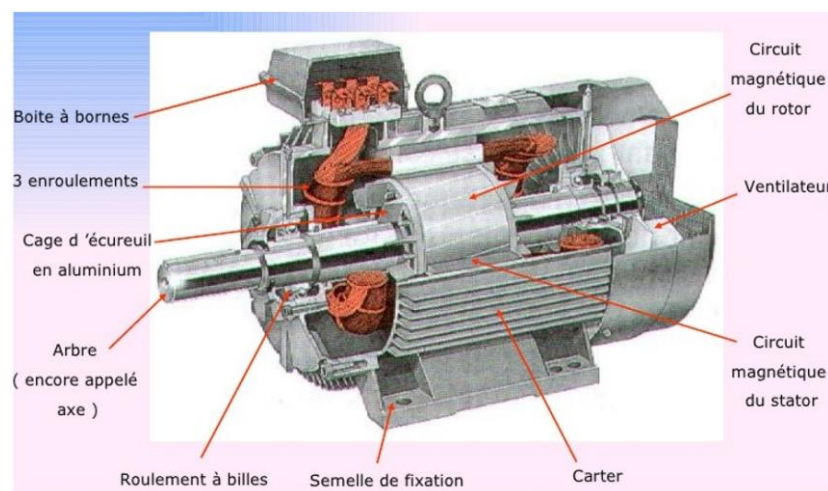


Figure 1.1 Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage

1.2.1 Constitution de la machine asynchrone triphasée :

1.2.1.1 Stator

Les différents types des moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor ; dans tous les cas le stator reste dans son principe, le même. 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 (figure 1.2) [2].

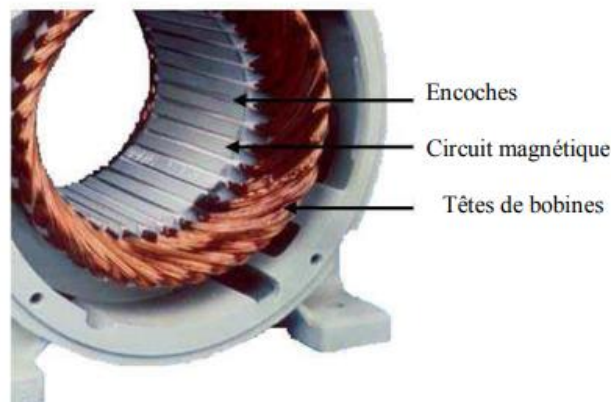


Figure 1.2 Stator d'une machine asynchrone [2]

1.2.1.2 Rotor

C'est la partie tournante, il tourne à la vitesse de rotation n qui est inférieure à la vitesse synchrone n_s .

Il y a deux types de rotor dans la machine asynchrone :

1) Rotor bobiné

Les barres métalliques forment un enroulement triphasé, les extrémités de ces enroulements sont soudées à trois bagues, des balais frottant sur ces bagues permettent d'accéder au rotor [3].

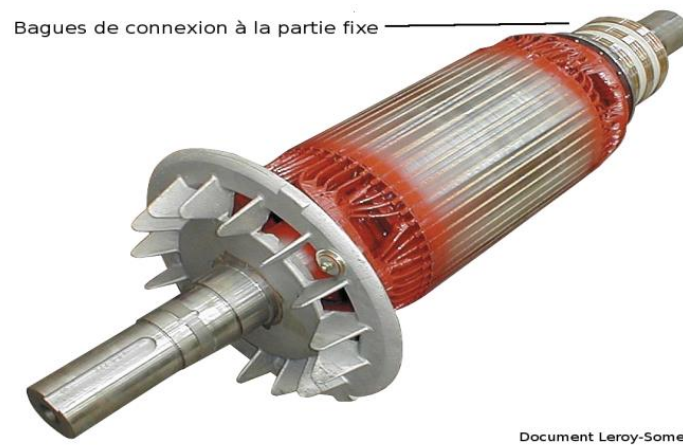


Figure 1.3 Rotor bobiné [3]

2) Rotor à cage d'écureuil

Les rotors à cage d'écureuil, les enroulements sont constitués de barres en cuivre utilisées pour les gros moteurs ou en aluminium pour les moteurs de petite puissance.

Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dits "de court-circuit". Il existe différentes structures de rotor à cage dépendant principalement de la taille du moteur et de la charge qui sera objet de l'entraînement [4].



Figure 1.4 Rotor à cage d'écureuil d'une machine asynchrone [2]

1.2.1.3 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 [5].

1.2.1.4 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du moteur asynchrone est basé sur l'induction des courants dans le bobinage du rotor par un champ tournant dans l'entrefer dû à la circulation des courants polyphasés dans le stator. Ce champ tournant va créer un couple moteur qui s'exerce sur les conducteurs des courants induits, Il provoque ainsi le démarrage et la rotation du rotor dans le même sens que le champ tournant [3].

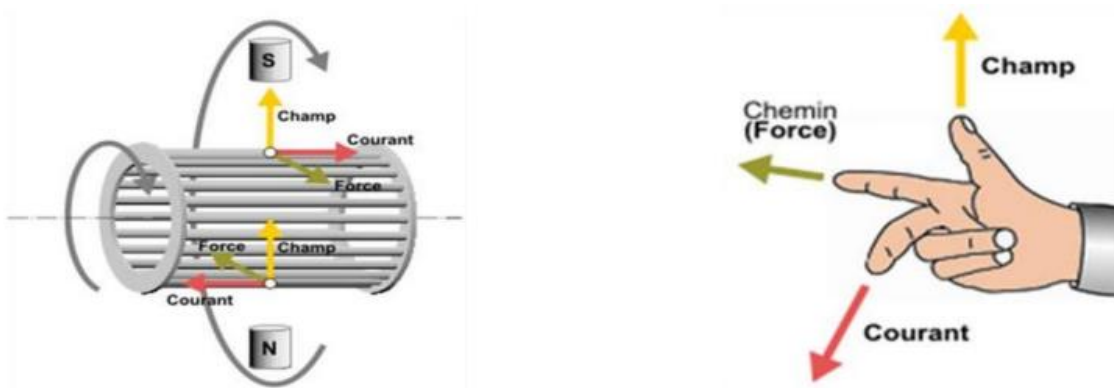


Figure 1.5 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage [4]

1.3 Types de défauts dans la machine asynchrone triphasée

Si l'on élimine les pannes dues à des causes intrinsèques, c'est-à-dire, résultant d'une mauvaise conception, d'une mauvaise fabrication ou d'un mauvais montage du moteur, les défaillances usuelles d'une machine asynchrone sont les suivantes [6] :

1.3.1 Les défauts statoriques :

- Court-circuit entre phases statoriques ou entre spires d'une même phase.
- Ouverture d'une phase.

- Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles) [6].

1.3.2 Roulements à billes

- Trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
- Ondulation de leur surface de roulement.
- Attaque des billes.
- Corrosion due à l'eau.
- Défaut de graissage, problème dû à la température.
- Décollement, effritement de surface, provoquée par une surcharge [7].

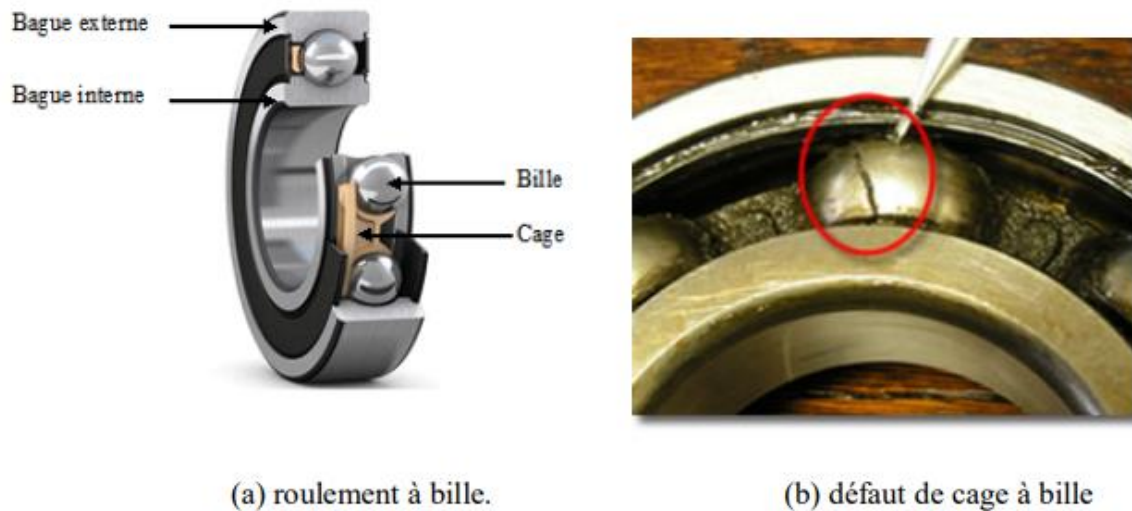


Figure 1.6 Roulements à billes [5]

1.3.3 Les défauts rotoriques

- Rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit.
- Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles).
- Défaut de roulements.
- Excentricité statique et/ou dynamique.

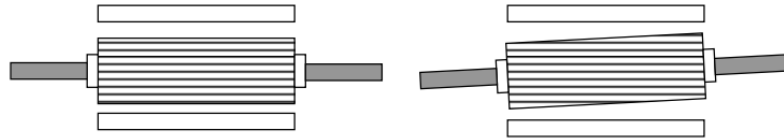


Figure 1.7 Excentricité statique et dynamique [7]

Ces dégâts peuvent avoir pour origines des problèmes de nature très différentes, souvent reliés les uns aux autres :

- Causes thermiques : balourds, points chauds, température ambiantes élevée.
- Causes électriques : transitoire d'alimentation, déséquilibres.
- Causes mécaniques : chocs en service, vibrations, jeux.
- Causes chimiques: corrosion, humidité.

La diversité des défauts et des causes possibles entraînant une panne dans la machine asynchrone, facilite les erreurs sur la nature et la localisation de cette panne. Un diagnostic fiable, nécessite donc une bonne connaissance des mécanismes des défauts à surveiller, ainsi que leurs conséquences sur les signaux issus de la machine [6].

1.3.4 Conséquences

Les défauts qui surviennent sur les machines asynchrones conduisent à de multiples problèmes qui affectent la rentabilité de l'installation globale, et qui peuvent aller jusqu'à l'arrêt total. On cite parmi les conséquences des défauts:

- Fluctuations au niveau du couple et de la vitesse.
- Appel supplémentaire de courant.
- Déséquilibre au niveau de la tension et du courant de ligne.
- Augmentations des arrêts non programmés, des pertes de production, et par conséquent, du rendement global [7].

1.4 Rupture de barres rotoriques

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau de court-circuit. 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 [13].

1.4.1 Rupture de portion d'anneau

La rupture d'une portion de l'anneau de court-circuit dans une machine asynchrone à cage, est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures peuvent être dues 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, voire 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, ...) 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 [13].

1.5 Méthodes de détection des défauts dans la machine asynchrone

1.5.1 Définition et objectif du diagnostic :

La détection, la localisation et l'identification des défauts sont les trois principales étapes du diagnostic des défauts. La détection est le processus qui consiste à signaler l'existence d'un défaut, tandis que la localisation de l'objet principal détermine le type de défaut ou l'emplacement de l'occurrence du défaut, et l'identification détermine le degré de gravité d'un défaut dans un système. La partie la plus avancée de la détection et de la localisation d'un composant ou élément défectueux dans un système électrique est le diagnostic.

L'objectif d'un système de diagnostic est de prévoir l'apparition d'un défaut le plus rapidement et le plus précisément possible (détection), afin que le défaut puisse être localisé, identifié et que le type maintenance approprié puisse être appliqué. En effet, afin d'expliquer plus précisément ce principe, nous rappellerons des fonctions de diagnostic telles que la détection, la localisation et l'identification des défauts [8].

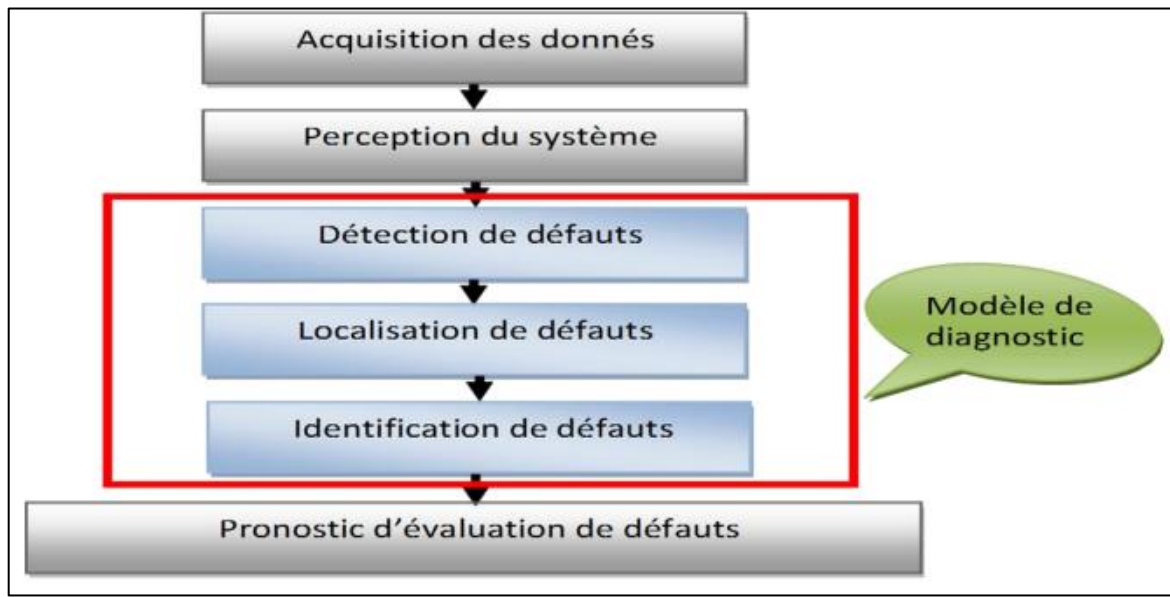


Figure 1.8 Les étapes du diagnostic [8]

1.5.2 Méthodes de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone

Les méthodes de diagnostics sont couvertes par une somme appréciable de travaux. Un consensus semble être établi pour définir trois méthodologies de diagnostic : méthodes de connaissances, méthodes de redondances analytiques et méthodes par modélisation de signaux [9] (voir figure 1.9).

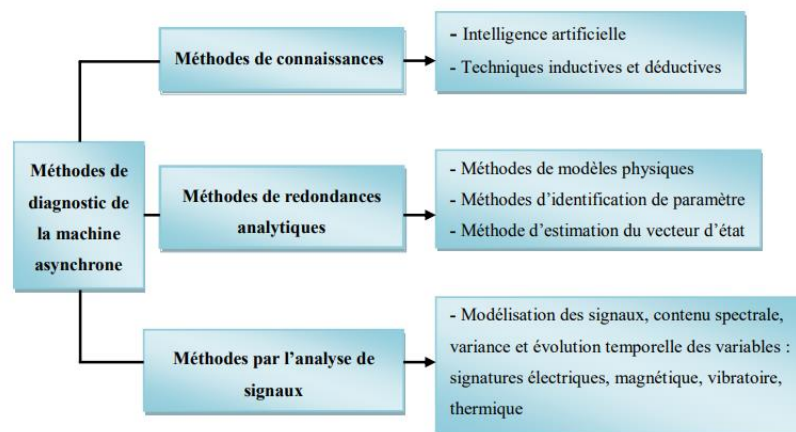


Figure 1.9 Méthodes de diagnostic de la machine asynchrone [9]

1.5.2.1 Les méthodes de connaissance

Ne pas décrire les relations de cause à effet à l'aide d'un modèle mathématique. La connaissance est basée uniquement sur l'expérience humaine, qui est complétée par la rétroaction. La littérature présente plusieurs techniques de détection des défauts à l'aide de ces méthodes. Les techniques d'intelligence artificielle mettent en œuvre la reconnaissance des formes, les systèmes experts, les réseaux neuronaux et la logique floue, qui peuvent être utilisés indépendamment ou en combinaison pour améliorer l'efficacité. Les méthodes inductives ou déductives ne s'appliquent pas directement au diagnostic, mais elles peuvent être utiles. Ils sont principalement utilisés pour définir les causes de défaillance par l'utilisation de modèles de pannes. Il convient de noter que ces méthodes sont davantage du ressort des automaticiens que des électrotechniciens [8].

1.5.2.2 Les méthodes de redondances analytiques

Sont fondés sur la modélisation quantitative du système et utilisent les relations entre les variables du système pour déterminer les paramètres physiques à surveiller. Les méthodes de modèles physiques, les méthodes d'identification des paramètres et les méthodes d'estimation des vecteurs d'état sont les trois types [8].

1.5.2.3 Méthodes de traitement des signaux

Sont des méthodes basées sur une modélisation des signaux, le contenu spectral, la variance et l'évolution temporelle des variables mesurées. Ces méthodes exploitent essentiellement les signatures électrique, magnétique, vibratoire, thermique ou la puissance instantanée. La démarche la plus souvent utilisée pour le diagnostic des défauts sur les machines électriques repasse sur l'analyse des grandeurs mesurables et les signaux de défaut. Les grandeurs et signaux de défauts les plus fréquemment utilisés sont : les courants statoriques, la tension d'alimentation, le flux de dispersion, le couple électromagnétique, la vitesse de rotation, la puissance instantanée aussi que les vibrations mécaniques [2]. Le tableau 1.1 résume les signatures spectrales qui caractérisent les défauts de la machine asynchrone à cage.

Tableau 1.1. Signatures spectrales des défauts de la machine asynchrone à cage [9]

Défauts	Signatures spectrales
Roulement	$f_{roul} = f_s \mp k f_r , k = 1, 2, \dots$ $f_{bille} = \frac{PD}{BD} f_r \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right]$ $f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_r \left[1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right]$ $f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_r \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right]$
Court-circuit statorique	$f_b = (1 \mp 2ks) f_s, k = 1, 2, 3, \dots$
Excentricités	$f_H = \left \left(\lambda \mp (kR + n_d) \frac{(1-s)}{p} \right) f_s \right $ $f_{exc} = f_s \mp k \cdot f_r , k = 1, 2, 3, \dots$
Cassure de barres rotoriques	$f_b = f_s \left[\frac{n}{p} (1-s) \mp k \right], n = 1, 2, 3, \dots, k = 1, 3, 5, \dots$

Avec:

P est le nombre de pair de pôles; f_s est la fréquence du réseau d'alimentation; s est le glissement.

f_r est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations, soit (f_b , $f_{b.int}$ ou $f_{b.ext}$).

n_b est le nombre d'éléments roulants, BD le diamètre d'un élément roulant, PD la distance entre les centres des billes diamétralement opposées, et β l'angle de contact des billes avec les bagues du roulement et f_r est la fréquence de rotation du rotor.

1.6 Modèle de la machine asynchrone

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement défectueux, la vérification sur prototype virtuel de l'efficacité des algorithmes de détection de défaut et elles apportent également

la possibilité de construire des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Parmi les approches de modélisations existantes, on cite [10] :

1.6.1 Approche analytique :

Les modélisations analytiques reposent sur le concept d'inductance, notion qui caractérise par définition une relation linéaire flux-courant. Toute considération de la saturation magnétique, phénomène physique (effet de peau, harmoniques de flux d'entrefer) omniprésent dans le fonctionnement normal de la machine, se trouve a priori exclue de cette approche. Cette approche globale des phénomènes électromagnétiques permet d'établir un schéma électrique équivalent de la machine [9].

1.6.2 Approche numérique :

On cite deux méthodes :

1) La méthode des réseaux de perméance :

Elle consiste à découper la machine en plusieurs tubes du flux caractérisés par des perméance. Le mouvement de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméance d'entrefer variable selon la position du rotor. Cette tient en compte aussi la saturation [10].

2) La méthode des éléments finis :

Il s'agit de découper la machine en éléments de tailles suffisamment petites, pour que le matériau magnétique puisse être considéré comme linéaire sur les surfaces correspondantes, et à partir des équations de MAXWELL, il est possible d'exprimer le problème à résoudre.

La méthode des éléments finis permet de reproduire fidèlement le comportement électromagnétique de la machine, et de simuler les défauts d'une manière plus proche de la réalité. Cependant, les moyens et le temps de calcul freinent l'utilisation de telles méthodes en simulation des algorithmes de détection des défauts [10].

1.7 Conclusion

Ce chapitre est un prétexte à l'exposition des notions très importantes en diagnostic, tels que les défauts qui peuvent toucher la machine asynchrone à cage, leurs causes et leurs signatures ainsi que la méthode de diagnostic de défaut par l'analyse des signaux.

CHAPITRE 2

***Modèle réduit de la machine
asynchrone triphasée à cage
issu du modèle multi
enroulements***

Chapitre 2

Modèle réduit de la machine asynchrone triphasée à cage issu du modèle multi enroulements

2.1 Introduction

Le modèle multi enroulement développé par plusieurs auteurs [11, 12] est d'une grande utilisation. Le comportement de la machine asynchrone est reproduit fidèlement par ce modèle lorsque celle-ci est en fonctionnement sain ou en défaut. Il a été développé sur la base d'une approche analytique. Celle-ci consiste à interpréter la machine du point de vue de la théorie des circuits où chaque enroulement du stator et chaque barre du rotor ainsi que le champ magnétique qui les lie peut être représenté par un simple modèle de circuits.

En se basant sur ce concept et pour pouvoir se focaliser sur la simulation des ruptures de barres, le rotor a été modélisé par des mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement, où une maille est constituée de deux barres et de deux portions d'anneaux qui les relient. L'ordre du modèle multi enroulements, selon N_r , le nombre de barres du moteur et le nombre d'équations qui régit le fonctionnement de la machine, est de $N_r + 3$. Ce qui rend ce modèle puissant, c'est que les résultats de simulation issus de ce modèle montrant les courants de phase, la vitesse de rotation et le couple électromagnétique, comme rapportés dans la littérature montrent qu'ils sont proches des résultats expérimentaux. On observe les ondulations dans les courants des phases, dans la vitesse ainsi que dans le couple identiquement à ceux dans l'expérimental. Cependant le modèle multi enroulements nécessite un temps de calcul assez long quoi qu'il reste très inférieur au temps de calcul qu'exige le modèle à base d'éléments finis qui, bien sûr est le modèle le plus proche de la réalité de la machine. Par conséquent on se focalise vers des modèles réduits qui doivent refléter le plus finement possible le comportement de la machine tout en consommant moins de temps de calcul et qui donne les mêmes résultats que le modèle multi enroulements. Tel est le modèle réduit issu du modèle multi enroulements.

Par contre, le modèle classique triphasé-biphasé (abc-dq) est simple et néglige un certain nombre de phénomènes entre autre le rotor à cage est considéré comme triphasé et ne reflète pas la réalité. De plus ces modèles décrivent le fonctionnement sain de la machine et sont fréquemment affectés par les transformations et le changement d'axe de référence ce qui ne permet pas la distinction entre les défauts venant des cassures de barres ou d'autres incidents. Aussi les résultats obtenus de la simulation de défauts de cassures de barres souffrent dans leur

interprétation. Ces résultats ne montrent aucune ondulation dans le courant statorique, par suite ceci confirme le manque de fidélité dans le modèle en ce qui concerne les défauts.

Enfin le modèle réduit issu du modèle multi enroulements doit pouvoir simuler le moteur sain et avec défaut en tenant compte des ruptures de barres.

2.3 Modèle réduit équivalent de la machine

2.3.1 Introduction

Rappelons qu'aussi performant qu'il soit le modèle multi enroulement de dimension $N_r + 3$ se trouve évalué par rapport au temps de calcul, certes ce dernier est très inférieur à celui attribué au modèle à base d'éléments finis mais il demeure assez long devant les modèles réduits.

Aussi le modèle réduit qu'on va proposer doit provenir du modèle multi enroulements lui-même et doit pouvoir simuler le moteur sain et avec défaut en tenant compte du défaut rotorique.

C'est dans cette condition que le modèle dq équivalent a été développé en considérant la cage rotorique avec toutes ses barres.

2.3.2. Transformation de Clarke généralisée

Cependant pour pouvoir passer au modèle réduit qui découle du modèle multi enroulements, il faut utiliser la transformation de Clarke généralisée. Cette transformation permet de passer d'une modélisation n-phasées "multi enroulements" à une modélisation diphasée équivalente, et elle est écrite de la façon suivante :

$$T_{3N_r}(\theta) = \frac{2}{N_r} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \cdots & \frac{1}{2} & \cdots & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta) & \cdots & \cos(\theta - kp \frac{2\pi}{N_r}) & \cdots & \cos(\theta - (N_r - 1)p \frac{2\pi}{N_r}) \\ -\sin(\theta) & \cdots & -\sin(\theta - kp \frac{2\pi}{N_r}) & \cdots & -\sin(\theta - (N_r - 1)p \frac{2\pi}{N_r}) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

ainsi que son inverse :

$$T_{3N_r}(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & \cos(\theta) & \cdots & -\sin(\theta) \\ 1 & \cdots & \cos(\theta - kp \frac{2\pi}{N_r}) & \cdots & -\sin(\theta - kp \frac{2\pi}{N_r}) \\ 1 & \cdots & \cos(\theta - (N_r - 1)p \frac{2\pi}{N_r}) & \cdots & -\sin(\theta - (N_r - 1)p \frac{2\pi}{N_r}) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Grâce à cette transformation, les différentes grandeurs diphasées s'expriment en fonction des grandeurs réelles de phases selon :

$$\begin{bmatrix} X_{odqs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{33}(\theta_{dq}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{abcs} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X_{abcs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{33}(\theta_{dq}) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_{odqs} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} X_{odqr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{3Nr}(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{kr} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X_{kr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{3Nr}(\theta) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_{odqr} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Nous nous sommes contentés de présenter directement le modèle réduit à partir des références [A. Abed].

2.3.3 Modèle réduit

L'application des transformations (2.3) et (2.4) permettent d'aboutir à un modèle de taille réduite pour la machine asynchrone qui se résume à :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{Rtr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{Ltr} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

où :

$\begin{bmatrix} R_{Rtr} \end{bmatrix}$ représente la matrice résistance réduite.

$\begin{bmatrix} L_{Ltr} \end{bmatrix}$ représente la matrice inductance réduite.

après calcul, ces matrices réduites $\begin{bmatrix} R_{Rtr} \end{bmatrix}$ et $\begin{bmatrix} L_{Ltr} \end{bmatrix}$ sont explicitées ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} R_{Rtr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_r L_{sc} & 0 & -\omega_r M_{sr} \frac{N_r}{2} \\ \omega_r L_{sc} & R_s & \omega_r M_{sr} \frac{N_r}{2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{rdd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{rqq} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} L_{Ltr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & -M_{sr} \cdot \frac{N_r}{2} & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & -M_{sr} \cdot \frac{N_r}{2} \\ -\frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rdq} & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rdq} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

où lorsque le moteur est sain, les valeurs de $\begin{bmatrix} R_{rdq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{rdd} & 0 \\ 0 & R_{rqq} \end{bmatrix}$ et L_{rdq} valent :

$$\begin{cases} R_{rdd} = R_{rqq} = 2R_b (1 - \cos a) + 2 \frac{R_e}{N_r} \\ L_{rdq} = L_{rp} - M_{rr} + 2L_b (1 - \cos a) + 2 \frac{L_e}{N_r} \end{cases} \quad (2.8)$$

La simulation de défaut exige l'ajout de termes supplémentaires qui résulte du calcul de :

$$\begin{bmatrix} R_{rfdq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{2N_r}(\theta) \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} R_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{rf} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} T_{2N_r}(\theta) \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.9)$$

où la matrice $\begin{bmatrix} R_{rf} \end{bmatrix}$ concerne les termes des barres en défaut.

Enfin la matrice pour l'état sain ou en défaut s'écrit :

$$\begin{bmatrix} R_{rfdq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{r11} & R_{r12} \\ R_{r21} & R_{r22} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

où les quatre termes de cette matrice sont :

$$\begin{aligned} R_{r11} &= R_{rdd} + R_{11df} \\ R_{r12} &= 0 + R_{12df} \\ R_{r21} &= 0 + R_{21df} \\ R_{r22} &= R_{rqq} + R_{22df} \end{aligned} \quad (2.11)$$

avec :

$$\begin{aligned} R_{11df} &= \frac{2}{N_r} (1 - \cos a) \cdot \sum_{k'}^{nk'} R_{bk'f} (1 - \cos(2k'+1)a) \\ R_{12df} &= -\frac{2}{N_r} (1 - \cos a) \cdot \sum_{k'}^{nk'} R_{bk'f} \sin(2k'+1)a \\ R_{21df} &= -\frac{2}{N_r} (1 - \cos a) \cdot \sum_{k'}^{nk'} R_{bk'f} \sin(2k'+1)a \\ R_{22df} &= \frac{2}{N_r} (1 - \cos a) \cdot \sum_{k'}^{nk'} R_{bk'f} (1 + \cos(2k'+1)a) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Dans ces expressions, l'indice k' caractérise une barre cassée, la sommation concerne donc toutes les barres qui présentent un défaut [15].

Ainsi, pour le modèle diphasé général il suffit de remplacer la matrice $\begin{bmatrix} R_{rdq} \end{bmatrix}$ dans la matrice (2.6) par la matrice $\begin{bmatrix} R_{rfdq} \end{bmatrix}$.

Le schéma de simulation est représenté à la figure 2.2.

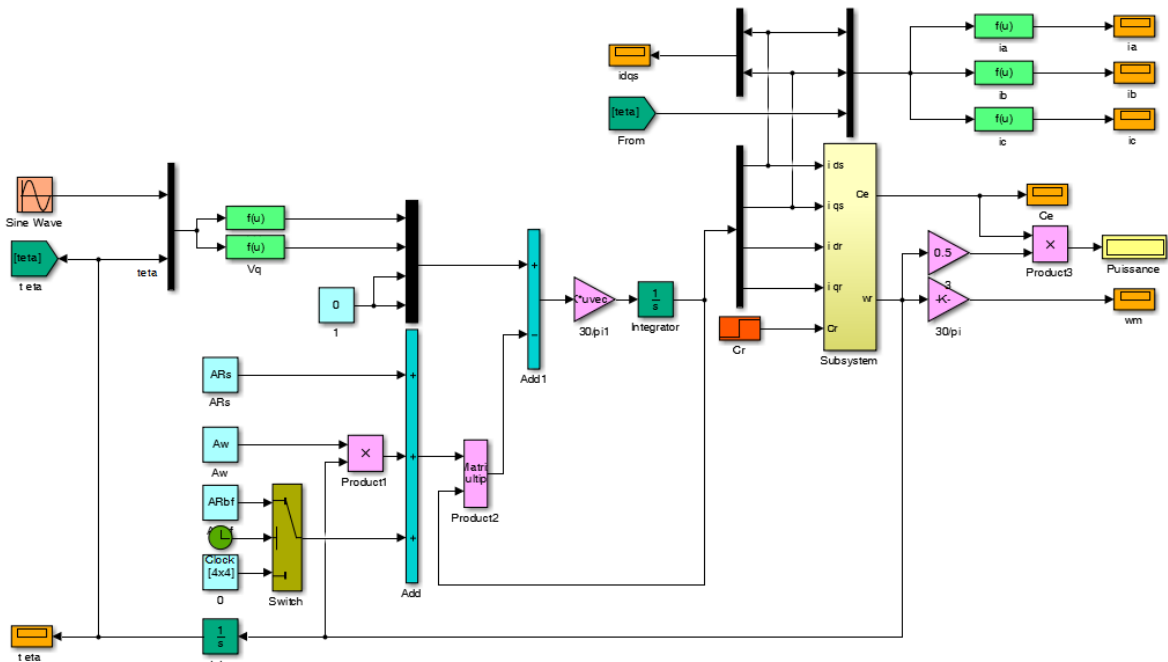


Figure 2.2 Schéma de simulation

2.4 Simulation du modèle réduit issu du modèle multi enroulements

Dans la littérature, le modèle réduit classique donne des résultats satisfaisants lorsque le moteur est à l'état sain, par contre lors de défauts ses résultats sont loin de la réalité et peuvent induire en erreur.

2.4.1 État sain

La procédure de simulation (Avec le modèle réduit issu du modèle multi enroulements) consiste à démarrer la machine à vide puis introduire une charge nominale à l'instant $t = 0.8s$ loin du régime transitoire. Les résultats sont collectés sur Workspace et sont présentés aux figures 2.3 à 2.5.

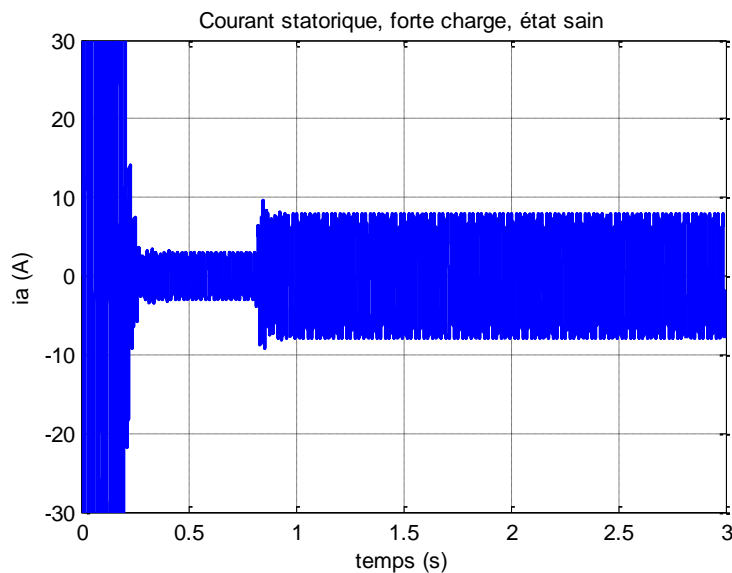


Figure 2.3 Courant statorique, état sain

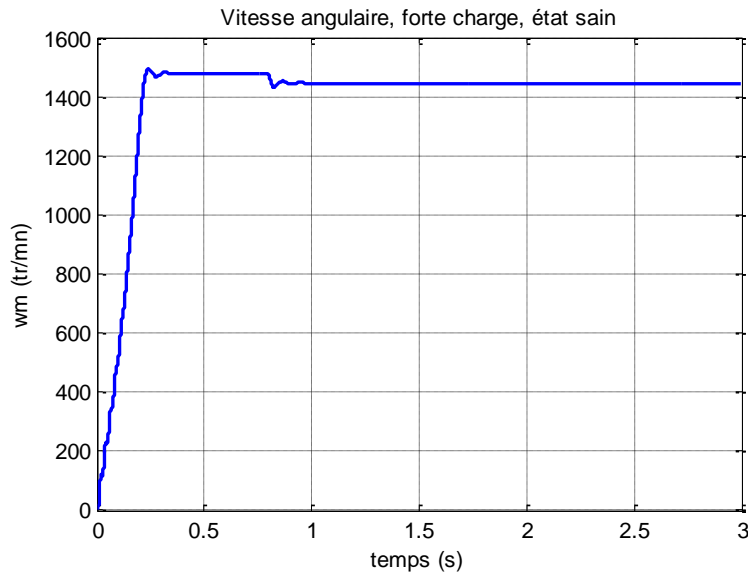


Figure 2.4 Vitesse de rotation angulaire, état sain

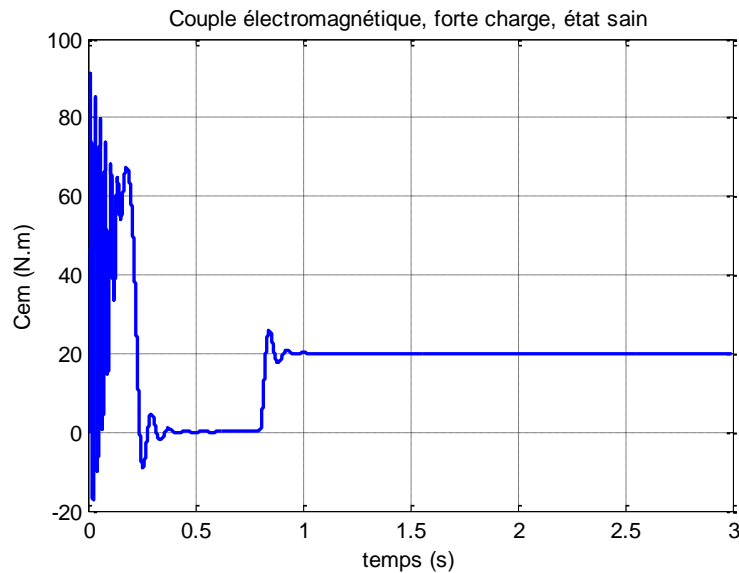


Figure 2.5 Couple électromagnétique, état sain

Les résultats obtenus grâce au modèle réduit qui découle du modèle multi enroulements ne présentent aucune anomalie ou déformation, ils sont similaires à ceux de la littérature. Ils sont satisfaisants.

2.4.2 État de défaut de cassure de barres

Le défaut rotorique ou cassure de barre est effectué en augmentant la valeur de la résistance des barres concernées comme citée dans la littérature. La simulation est réalisée en démarrant le moteur à vide puis lorsque le régime transitoire est largement dépassé (0,8 s) on introduit une faible charge de 5 Nm. Le moteur est toujours dans l'état sain ensuite à un instant, par exemple

$t = 1.8s$, on instaure le défaut de rupture de barre grâce à la possibilité que permet le programme. De cette façon les signaux de simulation obtenus couvriront les deux états ensemble sur un même graphe. Une première partie est l'état sain qui sera suivie à $t = 1.8s$ par une partie qui représente l'état de défaut. Les résultats sont présentés aux figures 2.6 à 2.11.

2.4.3 État de défaut, faible charge

La charge étant faible, la figure 2.6 qui représente le courant statorique montre une légère variation presque imperceptible à vue d'œil, mais avec le zoom (figure 2.7), on peut voir qu'à partir de 1.8 s il y a effectivement des variations.

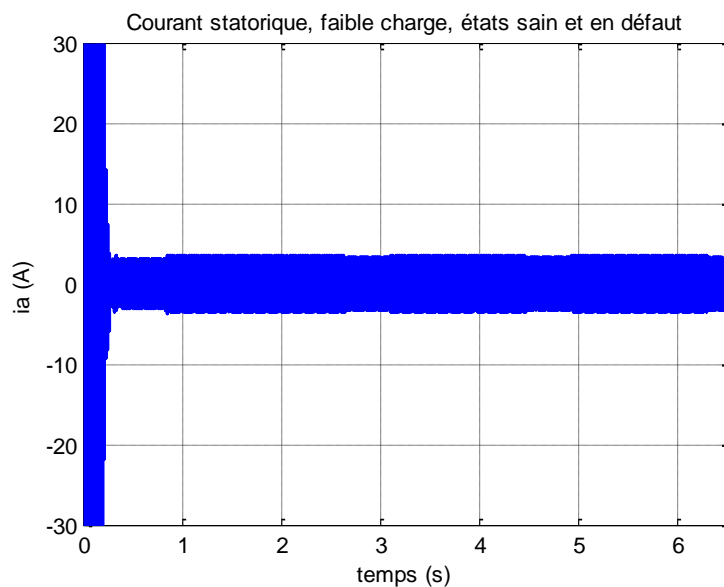


Figure 2.6 Courant statorique, état de défaut

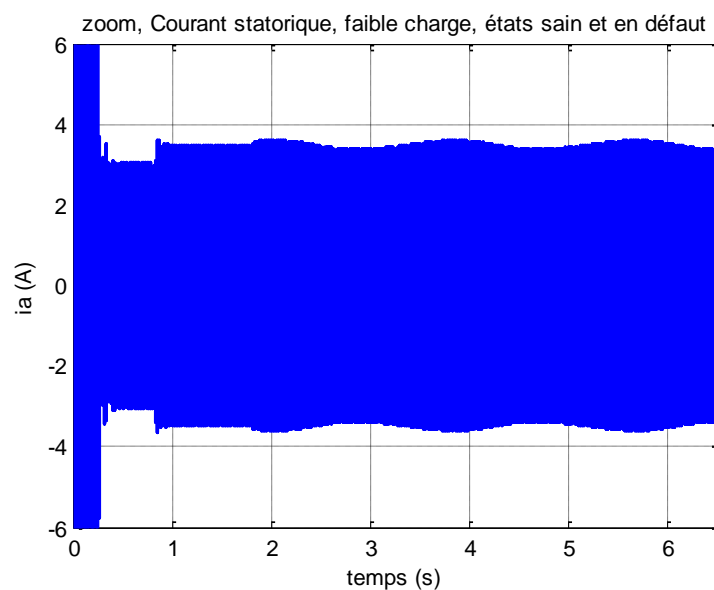


Figure 2.7 Zoom du courant statorique, état de défaut

Par contre le graphe de la vitesse angulaire de rotation présentée à la figure 2.8 laisse apparaître certaines ondulations, mais très bien visibles avec le zoom de la figure 2.9, signe qu'il y a défaut de cassure de barres.

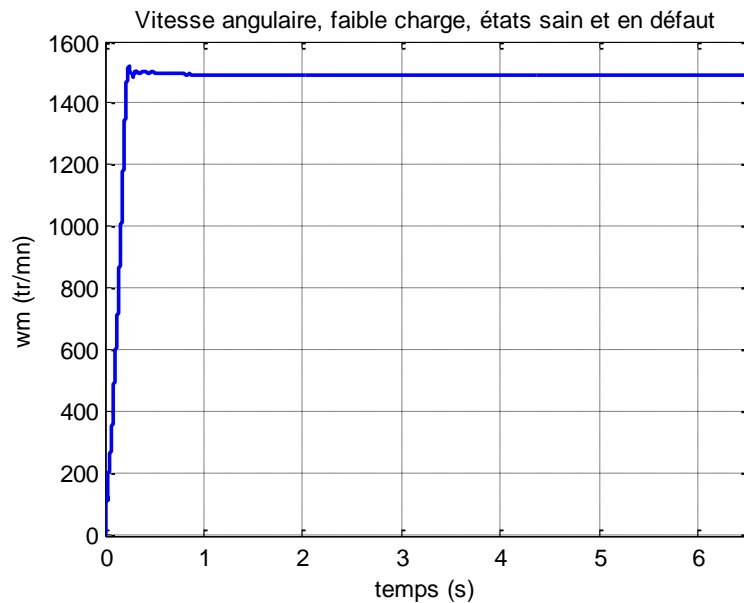


Figure 2.8 Vitesse de rotation angulaire, état de défaut

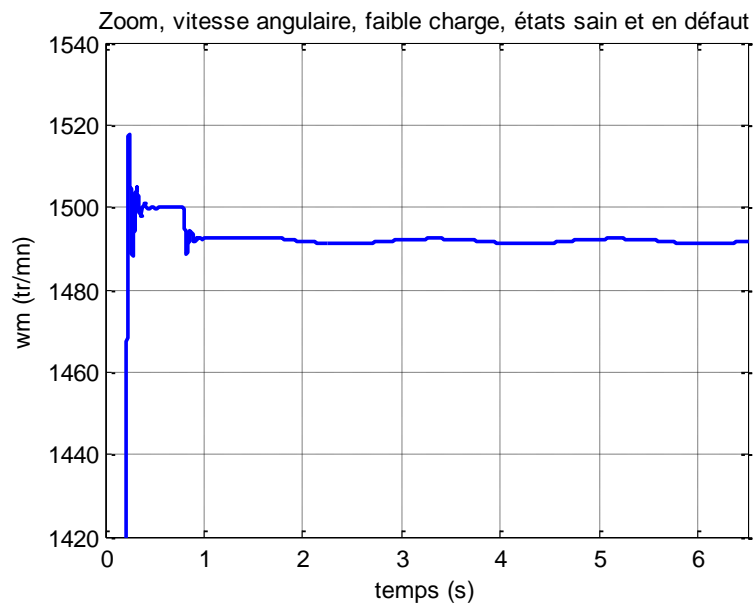


Figure 2.9 Zoom de la vitesse de rotation angulaire, état de défaut

Ensuite la figure 2.10 qui représente le couple électromagnétique ne permet de percevoir aucune modification à vue d'œil. Cependant lorsqu'on fait le zoom, on constate qu'effectivement il y a des ondulations causées par le défaut rotorique à partir de 1.8 s.

Nous constatons que pour les faibles charges il y a des difficultés à détecter les défauts lorsqu'ils sont minimes.

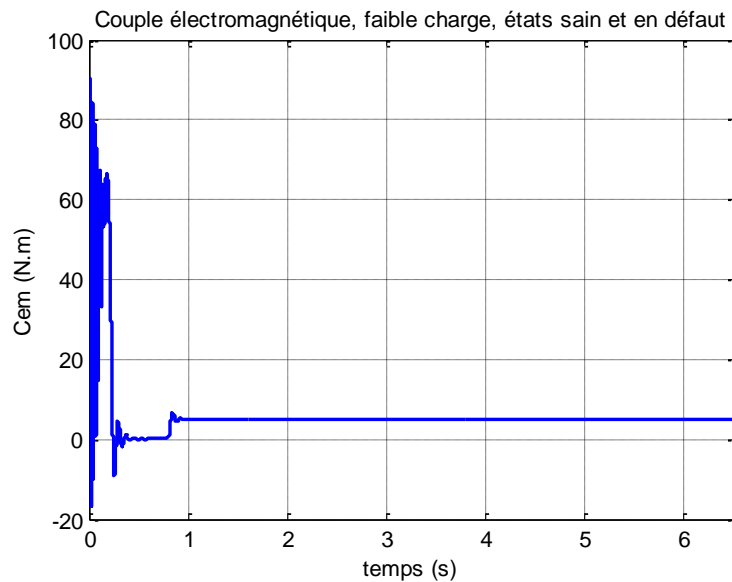


Figure 2.10 Couple électromagnétique, état de défaut

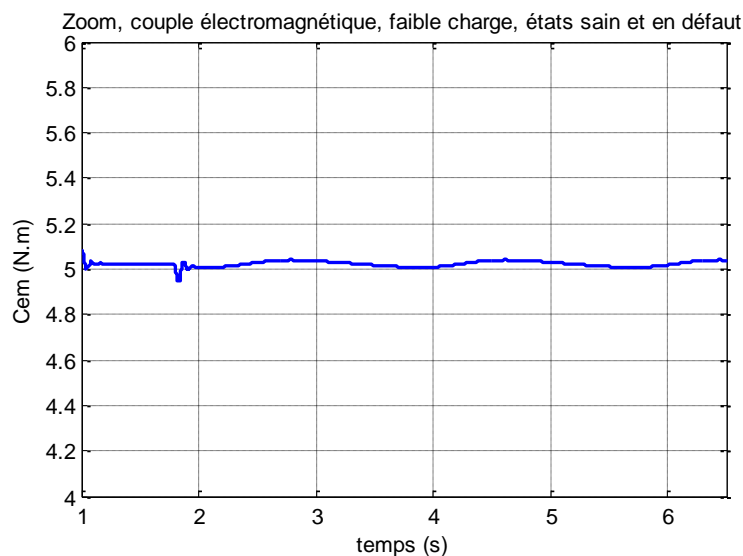


Figure 2.11 Zoom du couple électromagnétique, état de défaut

2.4.4 État de défaut, moyenne charge

De la même façon, le processus de simulation commence par démarrer la machine à vide et lorsque le régime transitoire est largement dépassé on injecte à l'instant $t = 0.8s$ un échelon de couple résistant valant 10 N.m pour les moyennes charges. Dans cette première partie le moteur est toujours dans l'état sain jusqu'à par exemple l'instant $t = 1.8s$ où l'on introduit le défaut rotorique grâce à la souplesse du programme, de telle sorte que les signaux obtenus réuniront sur un même graphique une partie saine et une autre en défaut. Les résultats sont présentés aux figures 2.12 à 2.18.

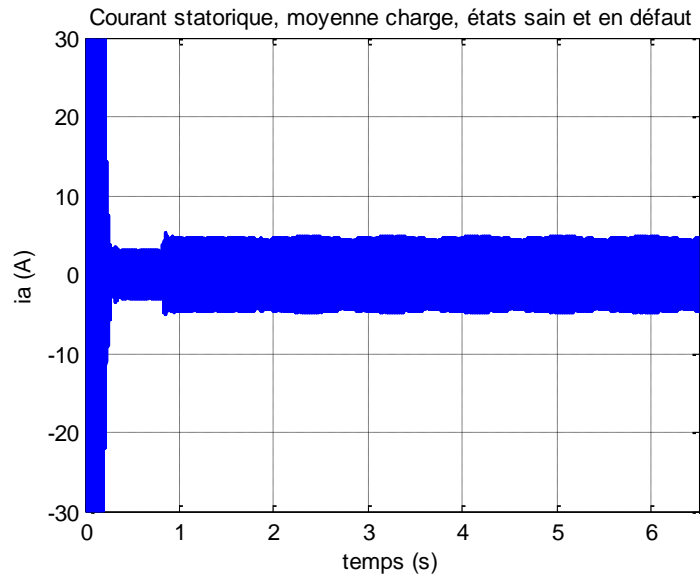


Figure 2.12 Courant statorique, état de défaut, moyenne charge

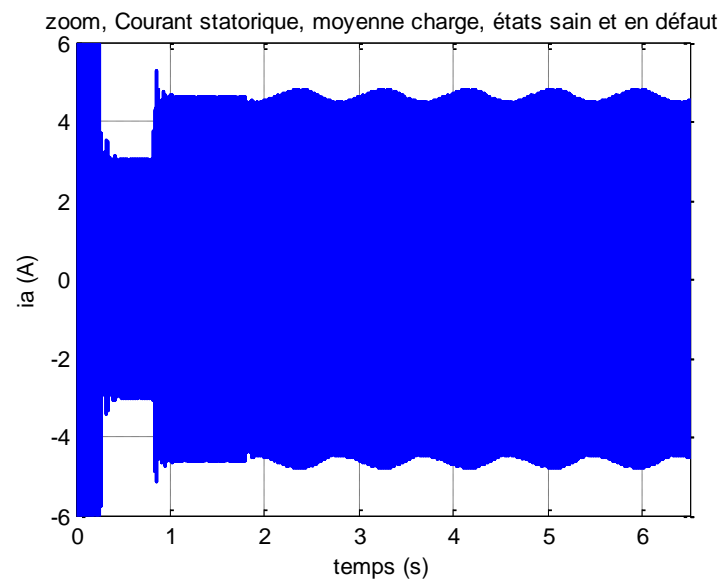


Figure 2.13 Zoom du courant statorique, état de défaut, moyenne charge

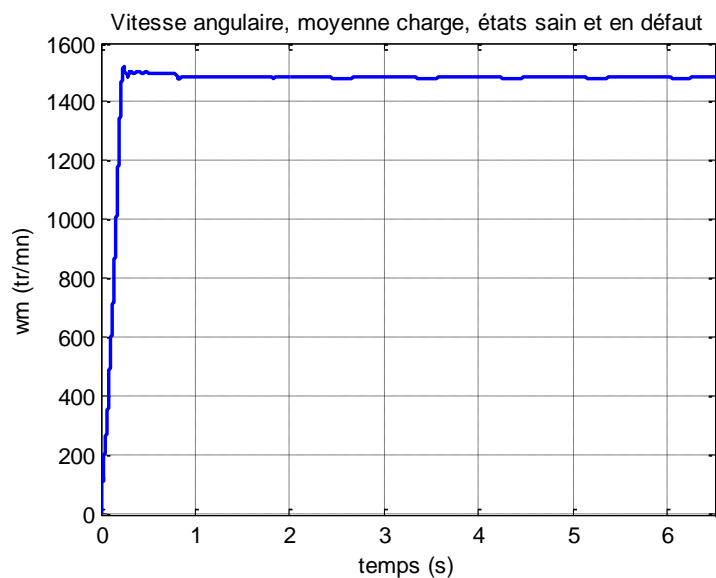


Figure 2.14 Vitesse de rotation angulaire, état de défaut, moyenne charge

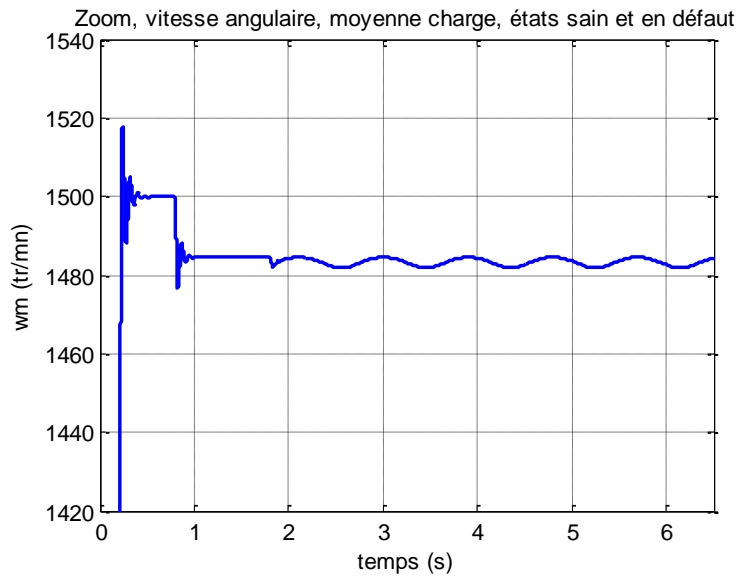


Figure 2.15 Zoom de la vitesse de rotation angulaire, état de défaut, moyenne charge

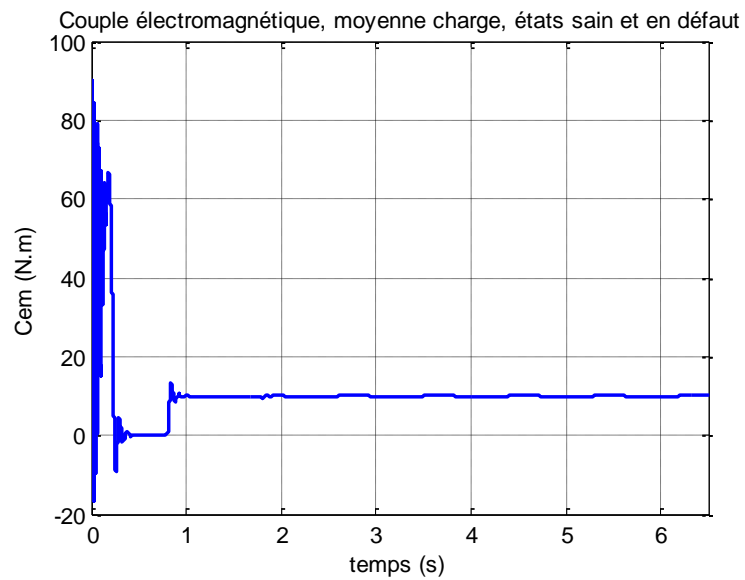


Figure 2.16 Couple électromagnétique, état de défaut, moyenne charge

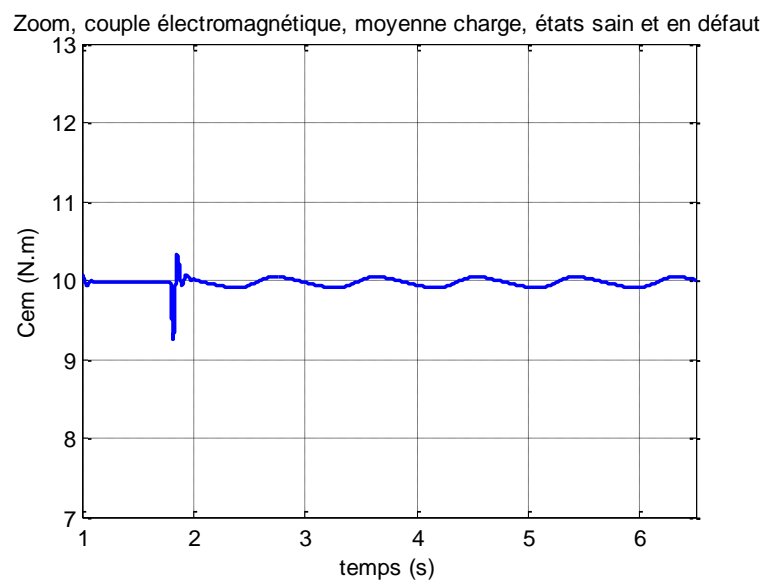


Figure 2.17 Zoom du couple électromagnétique, état de défaut, moyenne charge

La figure 2.12 montre le courant statorique pour une charge de 10 Nm. Dans cette figure, les ondulations sont visibles sans agrandissement et elles apparaissent à l'instant de l'instauration du défaut comme dans la littérature. Cependant grâce au zoom (figure 2.13) elles très évidentes.

La figure 2.14 qui représente la vitesse de rotation montre très clairement les ondulations qui sont apparues juste après l'instant de l'introduction du défaut comme c'est bien visible dans le zoom de la vitesse (figure 2.15).

Il en est de même pour le graphe du couple électromagnétique (figure 2.16) qui discerne franchement la brusque variation du couple à l'instant de l'amorçage du défaut et ses ondulations qui sont parfaitement franches dans le zoom de la figure 2.17.

2.4.5 État de défaut, forte charge

Pour les fortes charges nous avons suivi la même procédure pour la simulation, les résultats sont montrés aux figures 2.18 à 2.24.

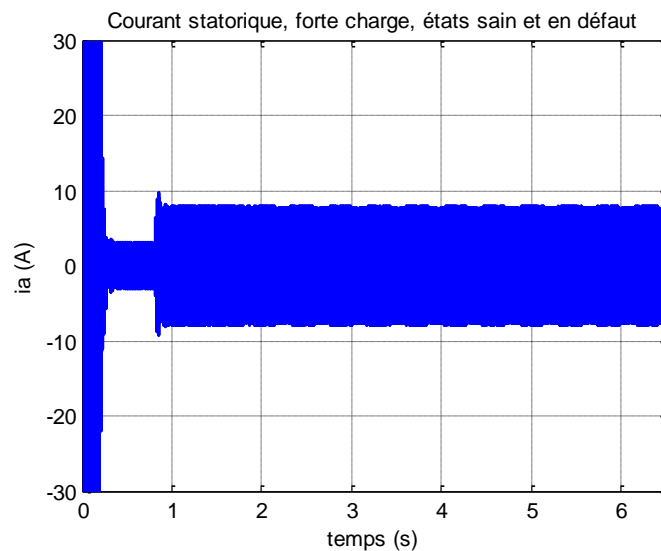


Figure 2.18 Courant statorique, état de défaut, forte charge

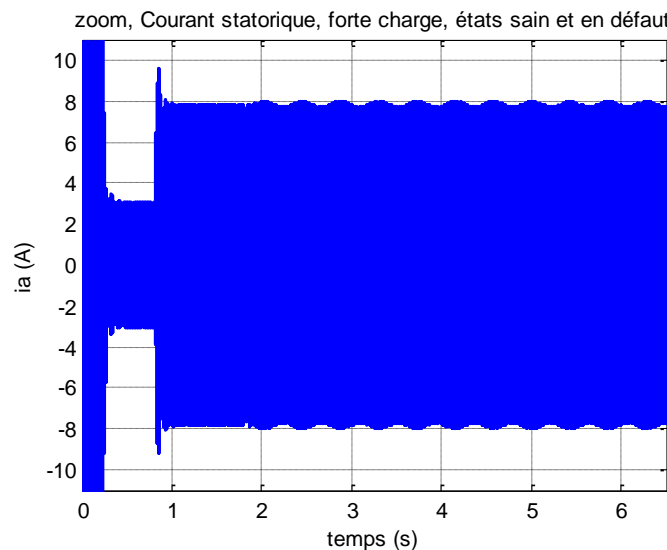


Figure 2.19 Zoom du courant statorique, état de défaut, forte charge

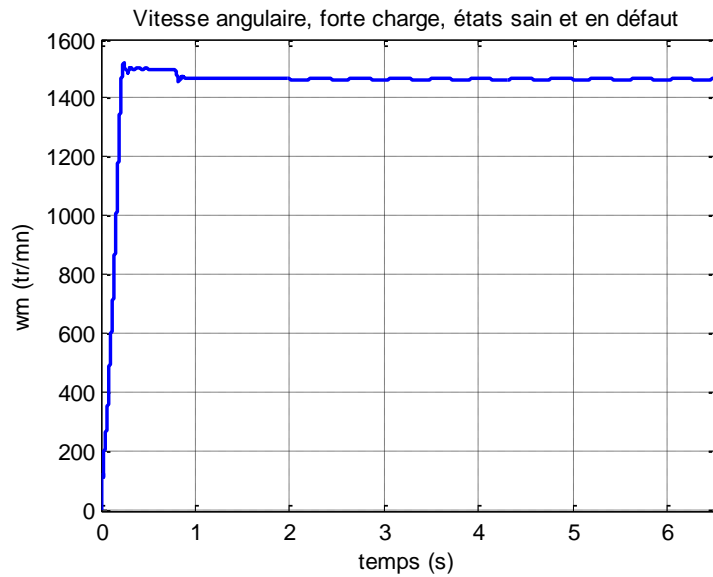


Figure 2.20 Vitesse de rotation angulaire, état de défaut, forte charge

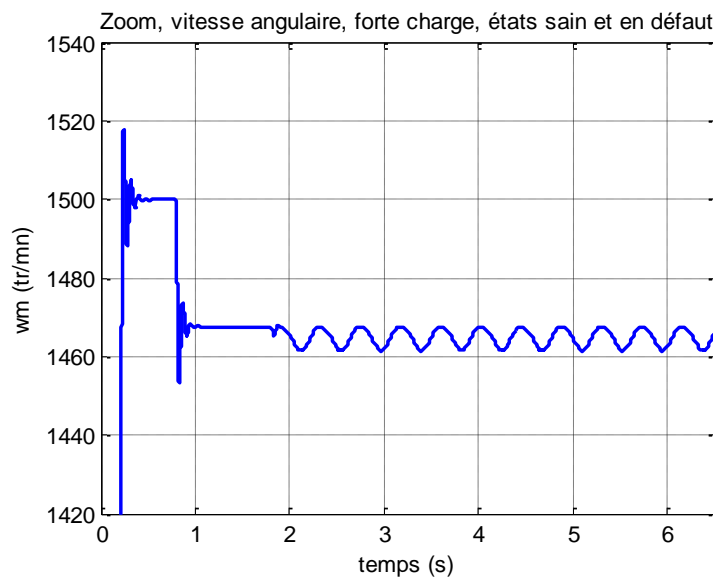


Figure 2.21 Zoom de la vitesse de rotation angulaire, état de défaut, forte charge

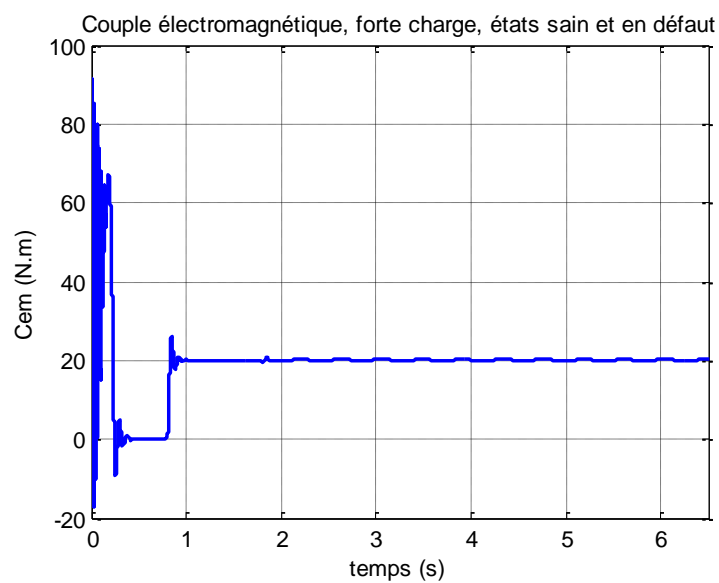


Figure 2.22 Couple électromagnétique, état de défaut, forte charge

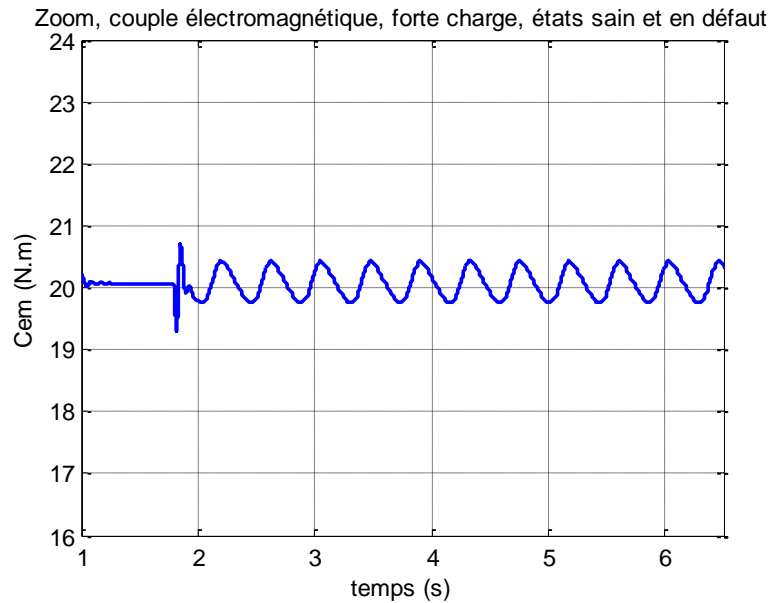


Figure 2.23 Zoom du couple électromagnétique, état de défaut, forte charge

La figure 2.18 montre le courant statorique pour une charge de 20 Nm. Dans cette figure, les ondulations sont très visibles et elles apparaissent à l'instant de l'instauration du défaut comme dans la littérature. Cependant grâce au zoom (figure 2.19) elles très évidentes.

La figure 2.20 qui représente la vitesse de rotation montre très clairement les ondulations qui sont apparues juste après l'instant de l'introduction du défaut comme c'est bien visible dans le zoom de la vitesse (figure 2.21).

Il en est de même pour le graphe du couple électromagnétique (figure 2.22) qui discerne franchement la brusque variation du couple à l'instant de l'amorçage du défaut et ses ondulations qui sont parfaitement franches dans le zoom de la figure 2.23. Rappelons que les ondulations dans les toutes les grandeurs oscillent à la fréquence $2 \cdot g \cdot f_s$ (avec g le glissement et f_s le fondamental).

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons passé en revue de manière très brève le modèle réduit issu du modèle multi enroulements. La simulation faite sur Matlab/Simulink du modèle réduit a mis en évidence que ce modèle possède les mêmes caractéristiques du modèle dont il est issu. Les résultats prouvent son efficacité quant à sa fidélité à reproduire le comportement de la machine saine ou en défaut et ceci pour toutes les charges comme nous l'avons constaté pour toutes les simulations faites où nous avons réunis ensemble les états sains et en défaut sur les mêmes

graphes. Cette étude a été faite dans le domaine temporel, dans le prochain chapitre nous traiterons les signaux grâce à la transformée de Fourier rapide TFR ou FFT en anglais.

CHAPITRE 3

Analyse spectrale des résultats de simulation et expérimentaux

Analyse spectrale des résultats de simulation et expérimentaux

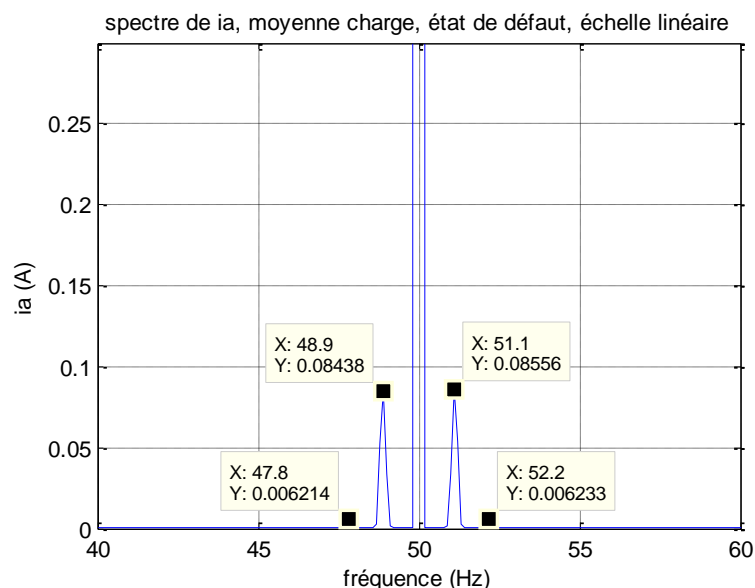
3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier les défauts rotorique par analyse spectrale en utilisant la FFT sur des signaux fournis par le modèle réduit issu du modèle multi enroulements et sur des signaux expérimentaux qui nous ont été fournis grâce au laboratoire LGEB de Biskra.

La simulation a été réalisée pour les moyennes et fortes charges. Cependant nous rappelons que le traitement par la FFT est différent de ce qui a précédé. Nous avons obtenus des signaux ou deux phases coexistent ensemble. Une phase d'un état sain et une autre qui contient l'état de défaut et le traitement par la FFT sur de tels signaux donnerait des résultats erronés, car l'analyse spectrale par la FFT exige que les signaux soient stationnaires et que leur durée de mesure ou de simulation soit suffisante afin d'obtenir une bonne résolution. En ce qui nous concerne, la durée est de 10 s de signal stationnaire (résolution $\Delta f = 0.1s$) que ce soit pour la simulation ou l'expérimental.

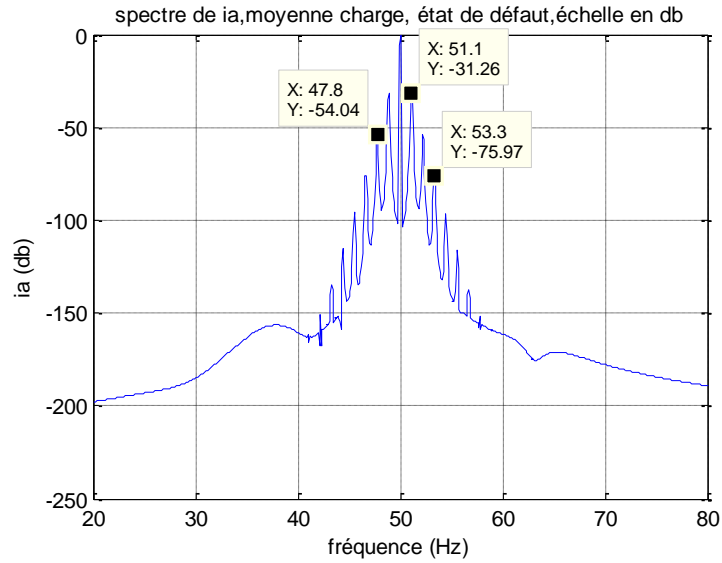
3.2 Moyenne charge

Nous voulons faire l'analyse spectrale des signaux issus du modèle réduit pour cela nous lançons la simulation de la machine à vide puis à 0.6 s nous injectons un échelon de couple de 10 N.m et à l'instant $t = 1s$ nous introduisons le défaut rotorique en augmentant la résistance des barres. La durée de la simulation est de 11s dont nous ne retiendrons que les 10 dernières secondes. Aussi la fréquence d'échantillonnage est de 10 kHz. Après simulation les résultats collectés sont rassemblés aux figures 3.1 à 3.6.

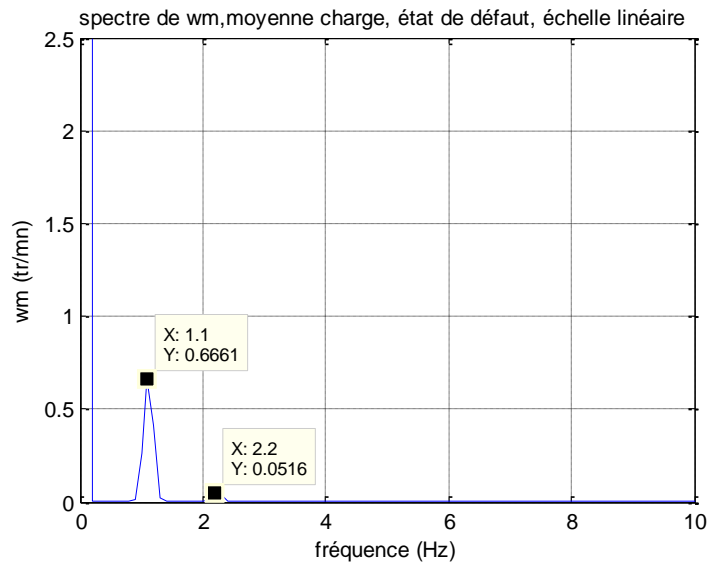


Figures 3.1 spectre de ia : échelle linéaire, état de défaut

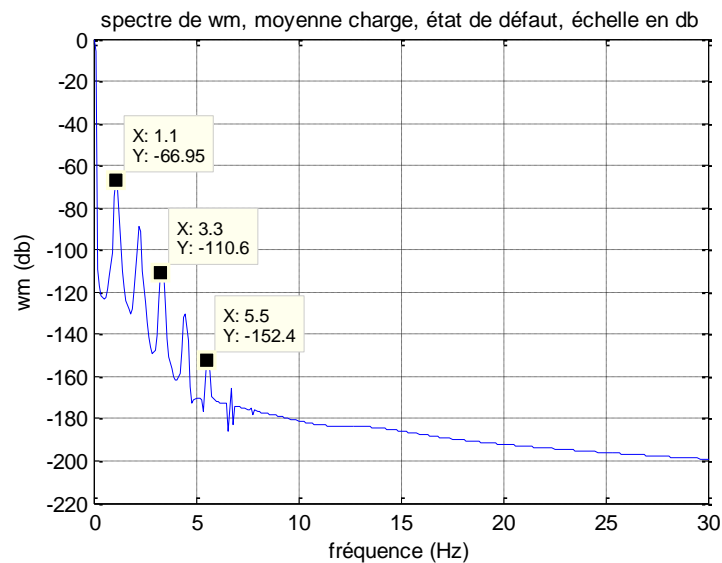
Tous les signaux sont représentés sur deux échelles, l'une en linéaire l'autre en décibels (db).



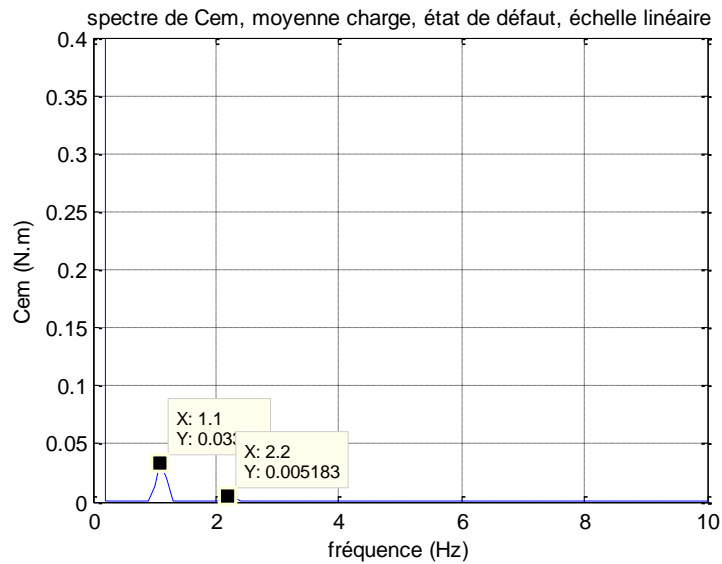
Figures 3.2 spectre de ia : échelle en db, état de défaut



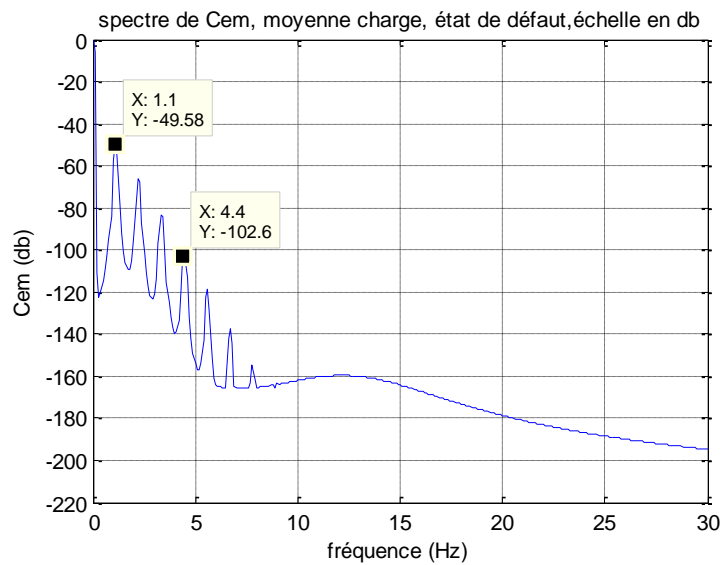
Figures 3.3 spectre de la vitesse wm : échelle linéaire, état de défaut



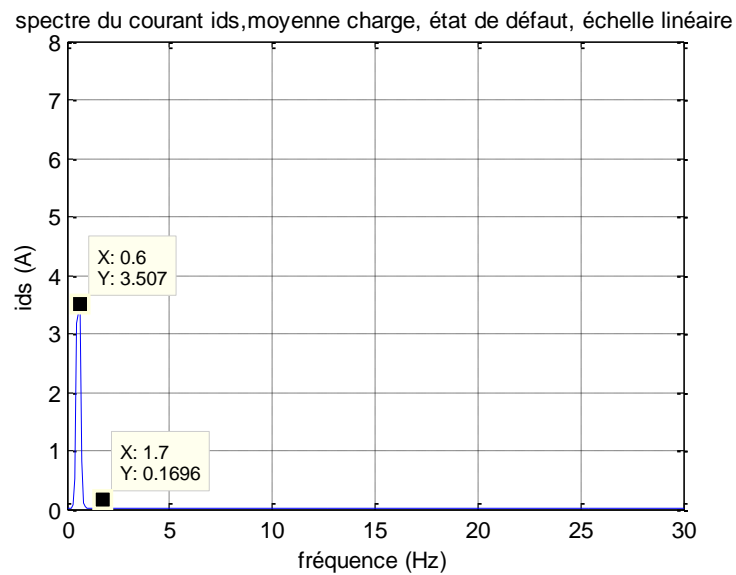
Figures 3.4 spectre de la vitesse wm : échelle en db, état de défaut



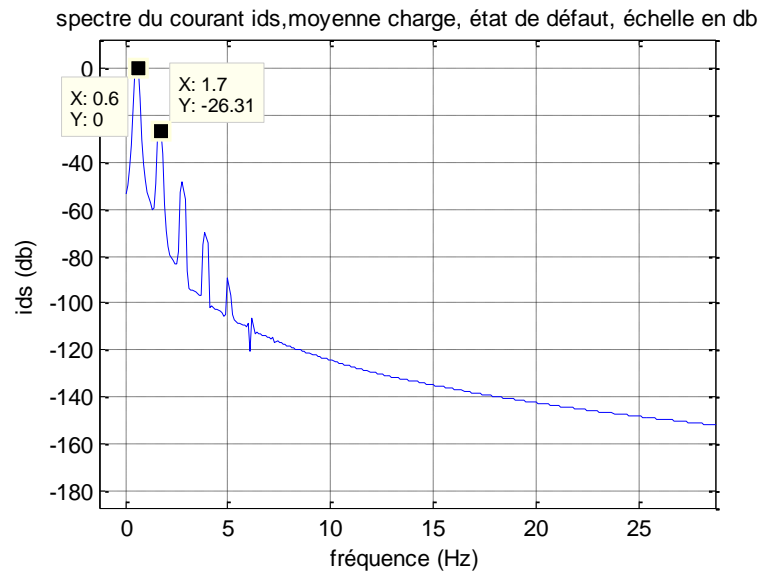
Figures 3.5 Spectre du couple électromagnétique : échelle en linéaire, état de défaut



Figures 3.6 Spectre du couple électromagnétique : échelle en db, état de défaut



Figures 3.7 Spectre du courant ids : échelle linéaire, état de défaut



Figures 3.8 Spectre du courant ids : échelle en db, état de défaut

La figure 3.1 représente le spectre du courant statorique i_a obtenu après inversion grâce à la transformation inverse de Park. Quatre raies (harmoniques de défaut) sont apparues dans cet agrandissement. Ils sont répartis de part et d'autre du fondamental de 50 Hz. Aussi dans la figure 3.2 qui est aussi le spectre du courant i_a mais dans l'échelle en db. Comme on le constate on observe beaucoup plus de raies que dans l'échelle en linéaire ceci est dû au pouvoir du logarithme qui a la possibilité de faire apparaître même les harmoniques les plus minimes. Cependant par habitude, la lecture en linéaire est immédiate.

Le deuxième spectre en linéaire montré à la figure 3.3 est celui de la vitesse, le fondamental se trouve à la fréquence zéro. Le premier harmonique de défaut se trouve à la fréquence $2 \cdot g \cdot f_s$ valant 1.1 Hz, suivi de tous les autres bien visibles, tous séparés par la distance $2 \cdot g \cdot f_s$ comme décrit dans la littérature et montrés à la figure 3.4 en échelle décibel.

Le troisième spectre est celui du couple électromagnétique, lui aussi est représenté sur deux échelles. Les deux figures 3.5 et 3.6 montrent le fondamental à la fréquence nulle suivi des harmoniques représentant le défaut rotorique dont un plus grand nombre est exposé à la figure en échelle en db. De même les harmoniques de défaut sont distants de $2 \cdot g \cdot f_s$. Nous pouvons dire que les ondulations observées sur les signaux temporels courant, vitesse et couple ont pour fréquence $2 \cdot g \cdot f_s$ comme c'est constaté dans les spectres et rapporté dans la littérature.

Aussi le spectre du courant ids dans le repère rotorique est montré aux figures 3.7 et 3.8. La figure 3.7 montre le fondamental à la fréquence $g \cdot f_s$ avec un harmonique de défaut distant de $2 \cdot g \cdot f_s$. La figure 3.8 présente son spectre avec une échelle en db où l'on voit bien le fondamental suivi par la série d'harmoniques de défaut séparés de $2 \cdot g \cdot f_s$.

Enfin le tableau ci-dessous résume les différentes grandeurs telles que le glissement, la fréquence du fondamental, la fréquence de l'harmonique à gauche du fondamental ainsi que celui à droite, le fondamental du courant ids dans le repère rotorique et enfin les harmoniques de défaut dans la vitesse et le couple électromagnétique.

Tab1

g	f_s	$f_{b-} = 1 - 2 \cdot g \cdot f_s$	$f_{b+} = 1 + 2 \cdot g \cdot f_s$	$g \cdot f_s$	$2 \cdot g \cdot f_s$
0.0111	50	48.8855	51.1145	0.5572	1.11

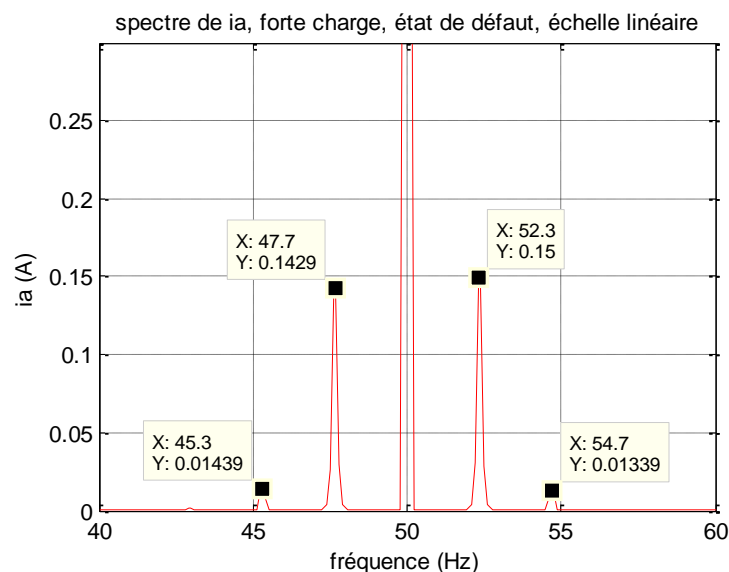
3.3 Forte charge

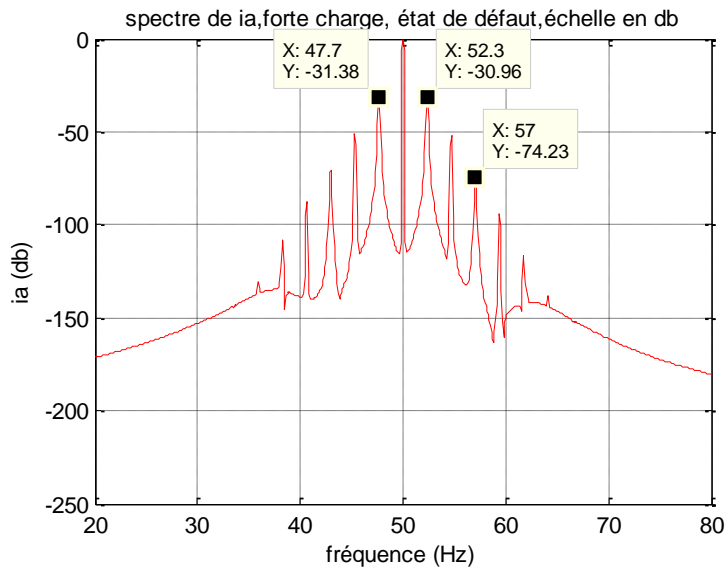
Dans le contexte de l'analyse spectrale par la FFT, nous lançons la simulation des fortes charges pour une machine de 3 kW. Comme précédemment, le démarrage de la machine est à vide suivi par un couplage d'une charge nominale de 20 N.m à l'instant 0.6 s ensuite l'instauration d'un défaut rotorique à $t = 1$ s. La durée de simulation pour les signaux stationnaires est (dans notre cas) de 10 s, par suite une résolution de 0.1 s. Les résultats de simulation sont réunis aux figures 3.9 à 3.16.

À la fin de la simulation le programme fournit (Tableau 2) les valeurs de différentes grandeurs telles que le glissement, la fréquence du fondamental, la fréquence de l'harmonique à gauche du fondamental ainsi que celui à droite, le fondamental du courant ids dans le repère rotorique et enfin les harmoniques de défaut dans la vitesse et le couple électromagnétique.

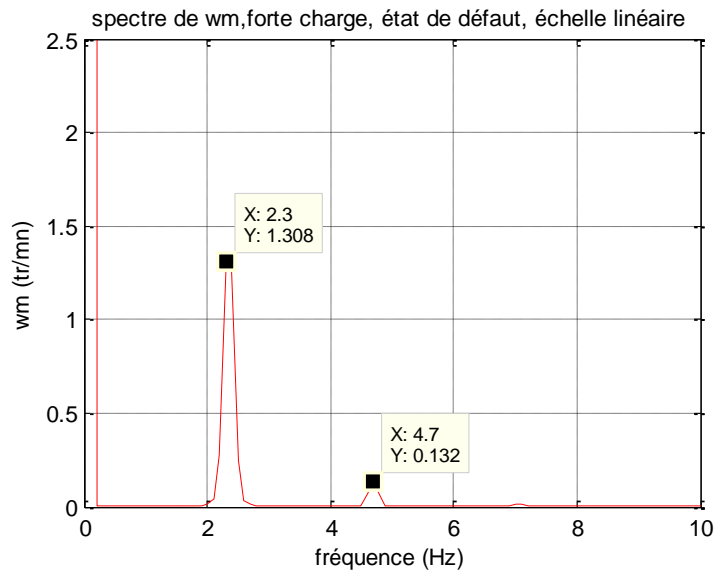
Tab2

g	f_s	$f_{b-} = 1 - 2 \cdot g \cdot f_s$	$f_{b+} = 1 + 2 \cdot g \cdot f_s$	$g \cdot f_s$	$2 \cdot g \cdot f_s$
0.0235	50	47.6542	52.3458	1.1729	2.3458

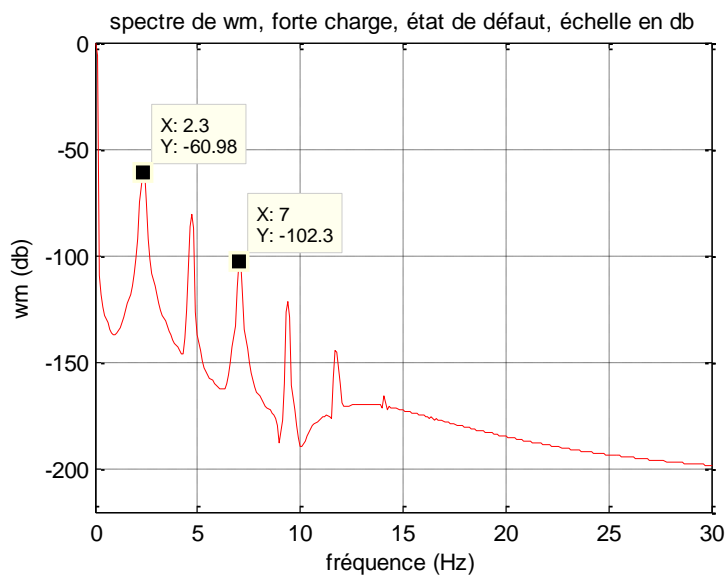
Figures 3.9 spectre de i_a : échelle linéaire, état de défaut



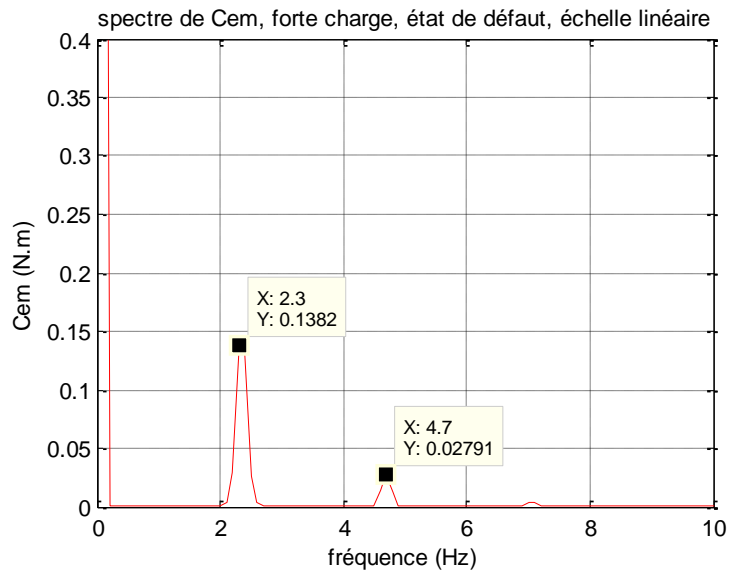
Figures 3.10 spectre de ia : échelle en db, état de défaut



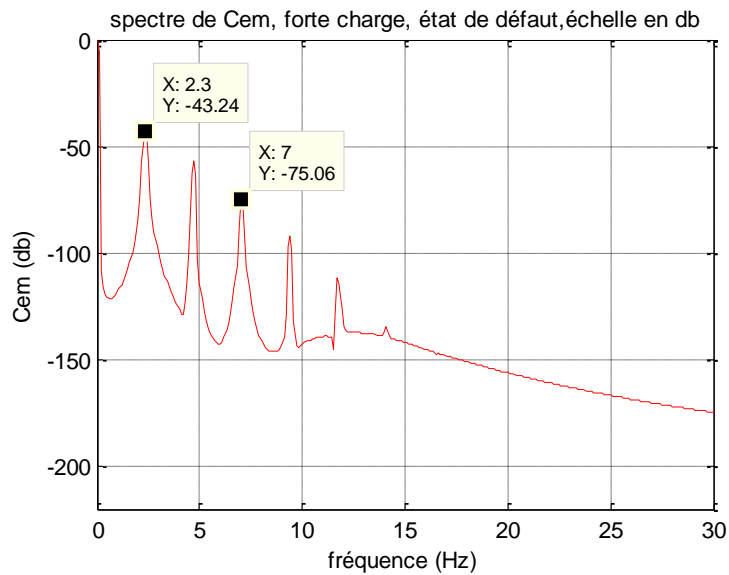
Figures 3.11 spectre de la vitesse wm : échelle linéaire, état de défaut



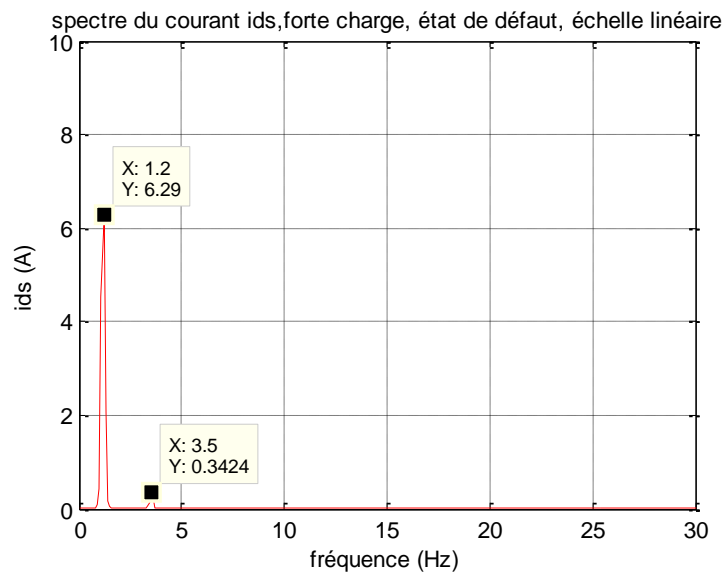
Figures 3.12 spectre de la vitesse wm : échelle en db, état de défaut



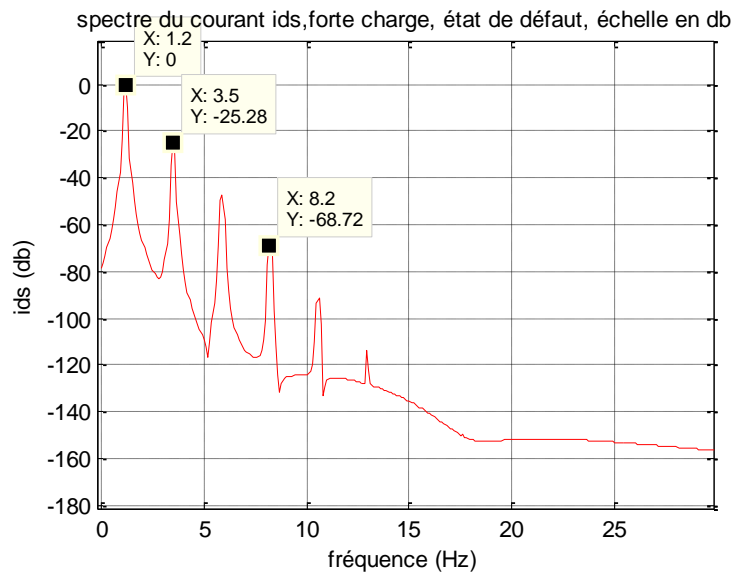
Figures 3.13 Spectre du couple électromagnétique : échelle en linéaire, état de défaut



Figures 3.14 Spectre du couple électromagnétique : échelle en db, état de défaut



Figures 3.15 Spectre du courant ids : échelle linéaire, état de défaut



Figures 3.16 Spectre du courant ids : échelle en db, état de défaut

Les valeurs calculées qui sont dans le tableau 2 sont confirmés dans les figures. La figure 3.9 qui représente le courant statorique montre son spectre. On constate que les harmoniques de défaut ont augmentés en amplitude et qu'ils se sont éloignés du fondamental de 50 Hz. Le spectre de la figure 3.10 en montre beaucoup plus, tous distants de $2 \cdot g \cdot f_s$ comme décrit dans la formule $f_b = 1 \pm 2k \cdot g \cdot f_s$ qui donne les fréquences des harmoniques de défaut de cassure de barres, avec f_s , g le glissement, $k = 1, 2, 3 \dots$ un entier.

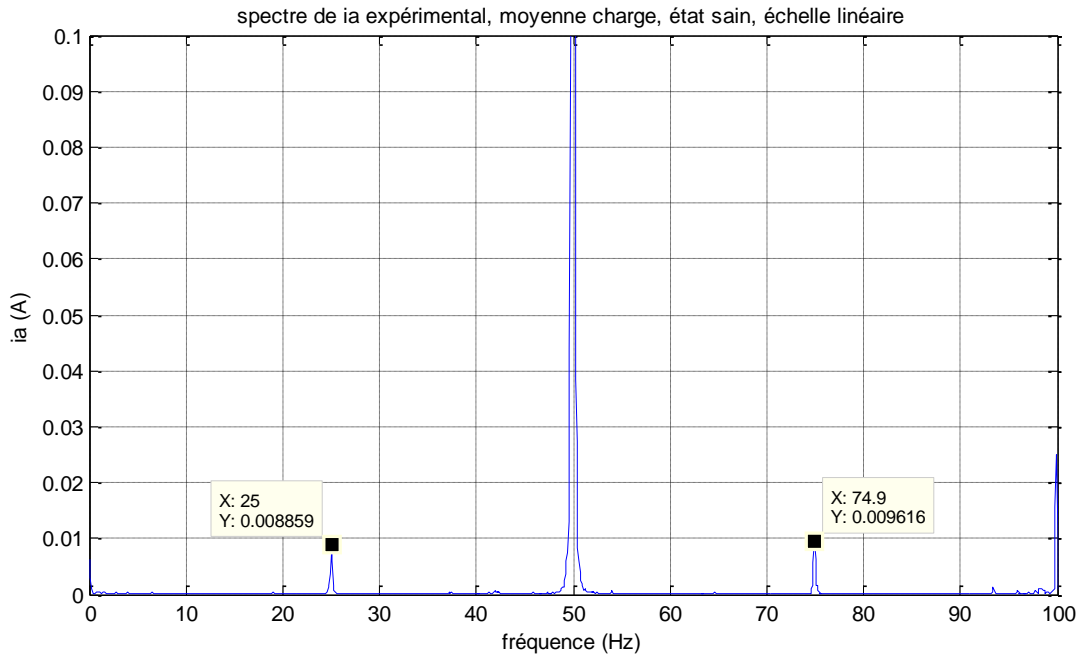
La figure d'après 3.11 représente le spectre de la vitesse de rotation angulaire où les harmoniques se sont éloignés du fondamental à la fréquence zéro et ont augmenté en amplitude. La figure 3.12 montre un nombre plus grand en harmoniques de défaut car le spectre est en échelle logarithmique. On observe les mêmes remarques pour le spectre du couple électromagnétique présentées aux figures 3.13 et 3.14.

Enfin comme dernières figures de simulation 3.15 et 3.16 celles du spectre de ids où le fondamental est positionné à $g \cdot f_s$ suivi par la série de raies de défaut séparées par $2 \cdot g \cdot f_s$.

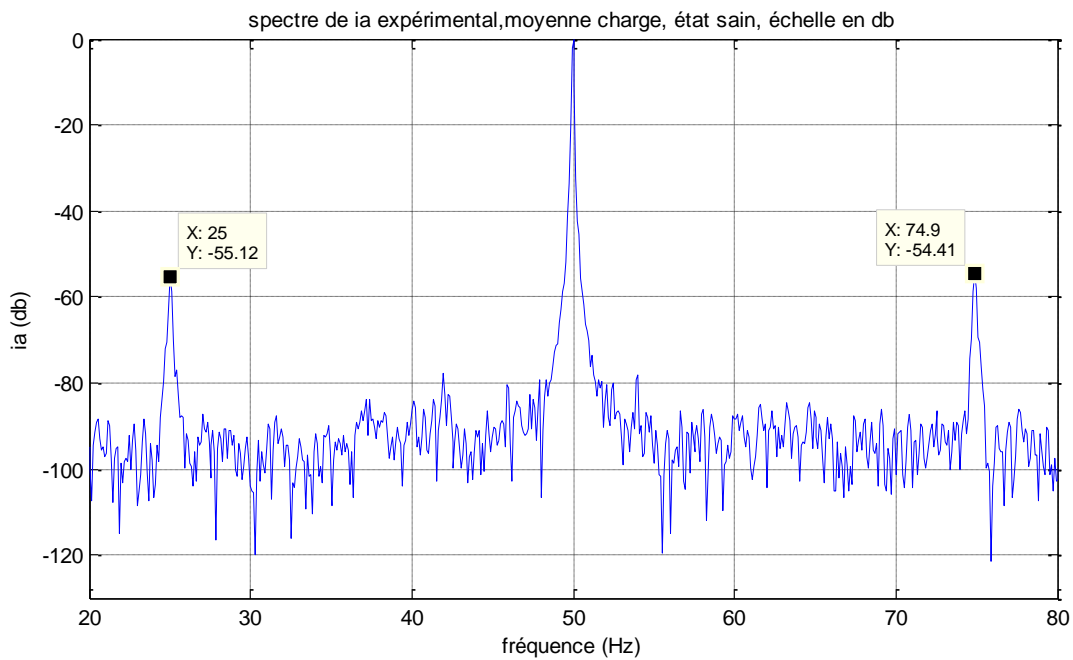
3.4 Signaux expérimentaux

Pour compléter ce chapitre nous nous sommes procuré des signaux de courants expérimentaux du laboratoire de Biskra LGEB pour 3 moteurs de 3 kW. Un moteur à l'état sain, un autre à une barre cassée et un dernier avec deux barres cassées. Dans ce qui suit nous allons présenter les signaux en temporel et leur spectre pour avoir une idée sur l'expérimental.

3.4.1 État sain



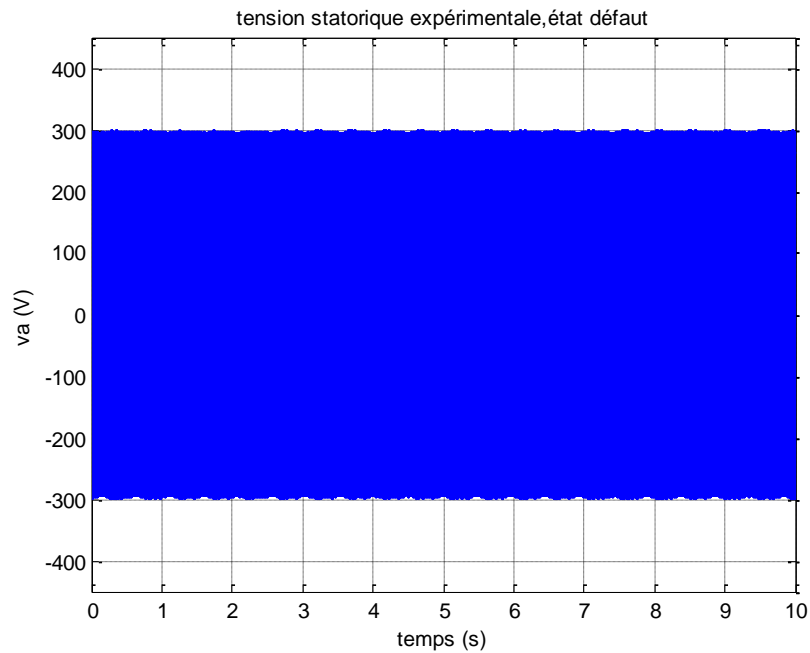
Figures 3.17 Spectre du courant statorique expérimental, moyenne charge, état sain, échelle linéaire



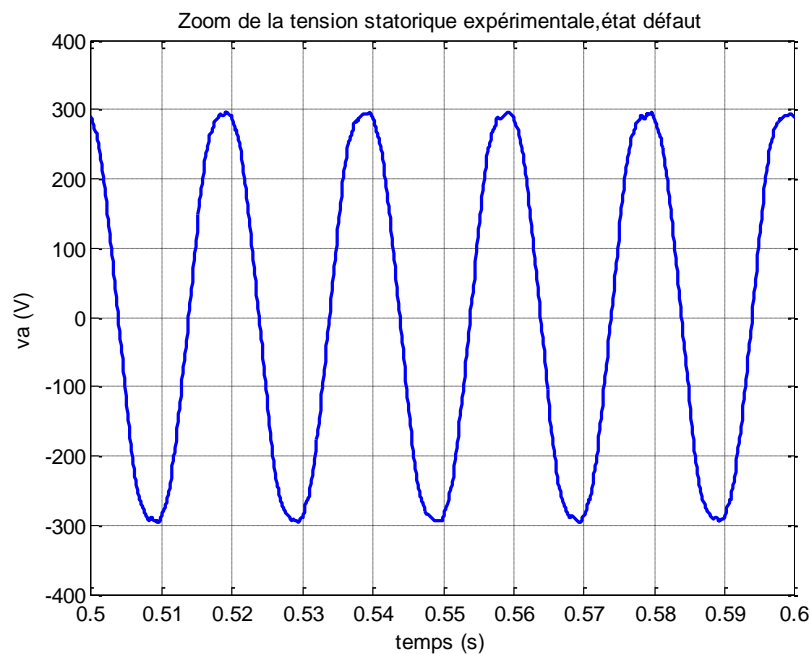
Figures 3.18 Spectre du courant statorique expérimental, moyenne charge, état sain, échelle en db

Nous commençons par l'état sain. Les figures 3.17 et 3.18 représentent les spectres du courant statorique expérimental d'un moteur à l'état sain moyennement chargé. Nous constatons que les harmoniques susceptibles être les harmoniques de défaut ont des amplitudes insignifiantes que même l'échelle logarithmique n'a pu les mettre en valeur, preuve que le moteur est sain.

3.4.2 État de défaut, une barre cassée, moyenne charge

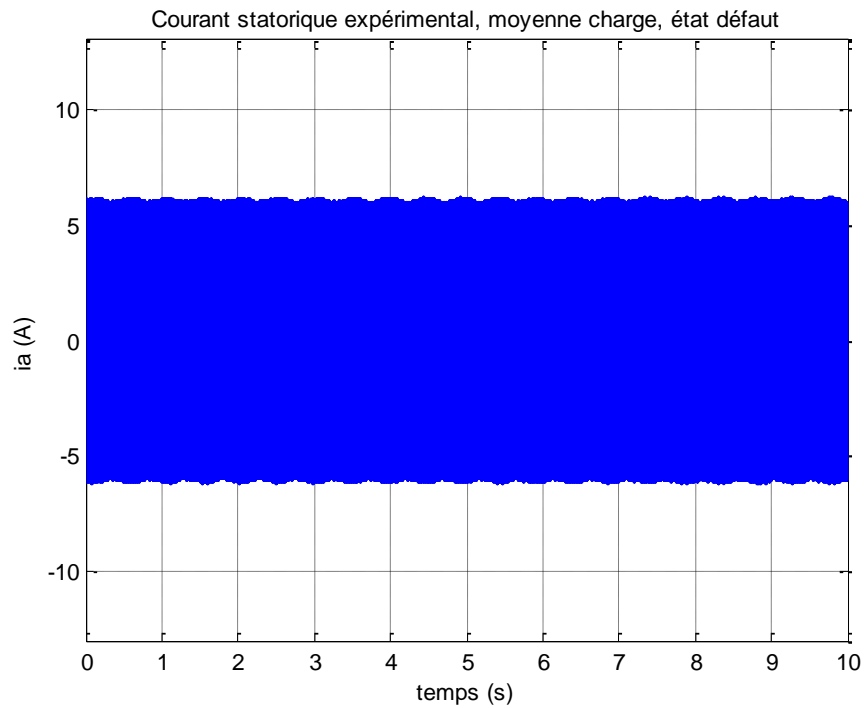


Figures 3.19 Tension statorique expérimentale, moyenne charge, état de défaut

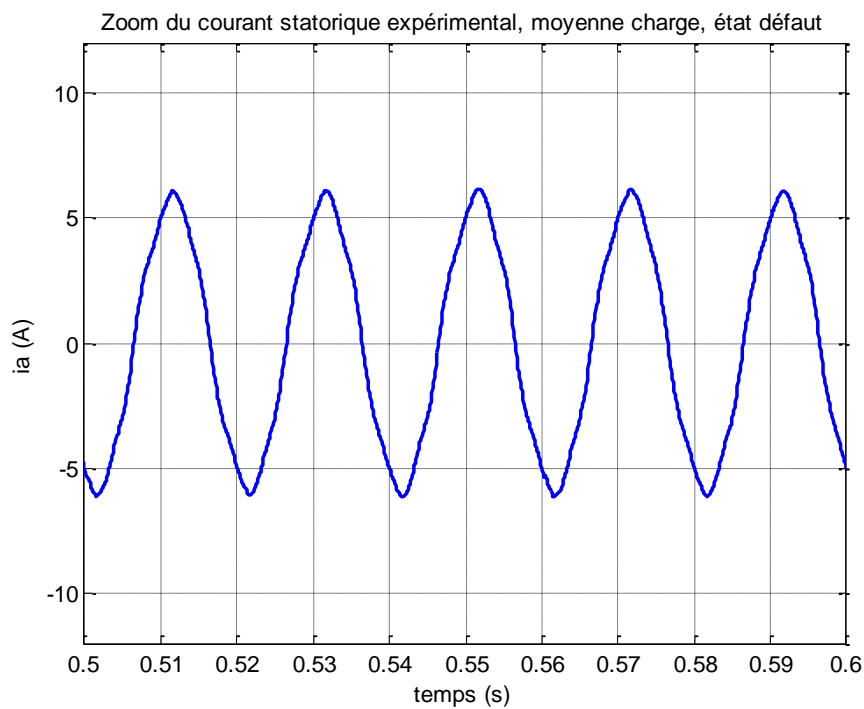


Figures 3.20 Zoom de la tension statorique expérimentale, moyenne charge, état de défaut

Les figures 3.19 et 3.20 ci-dessus montrent une phase de l'alimentation triphasée du moteur de 3 kW. Dans le zoom de la figure 3.20 on observe que la tension n'est pas parfaitement sinusoïdale.

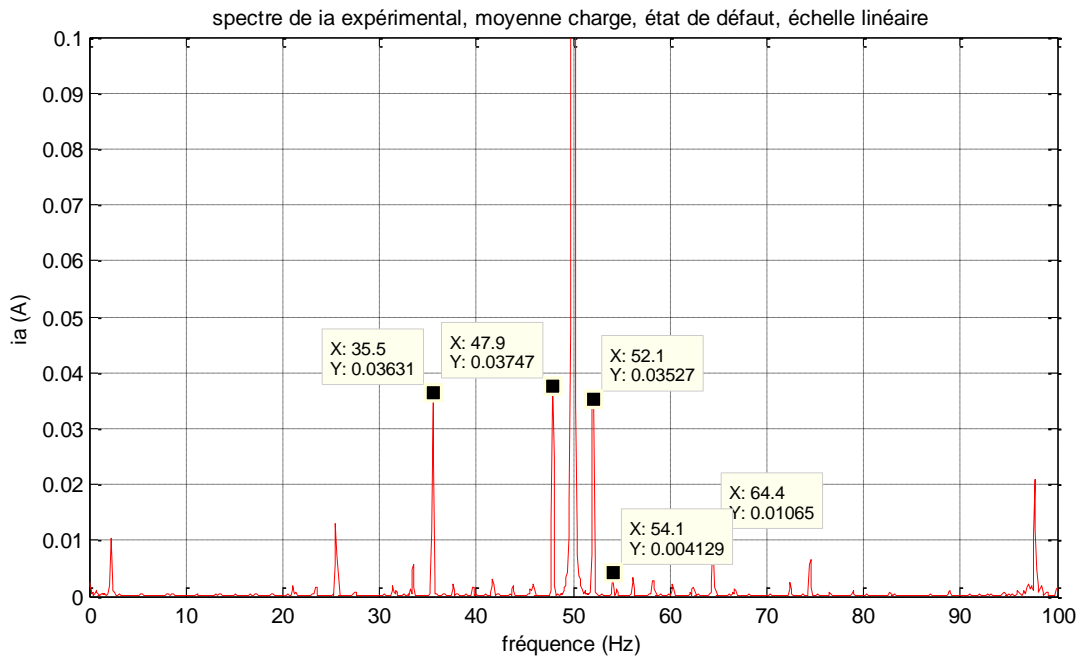


Figures 3.21 Courant statorique expérimental, moyenne charge, état de défaut

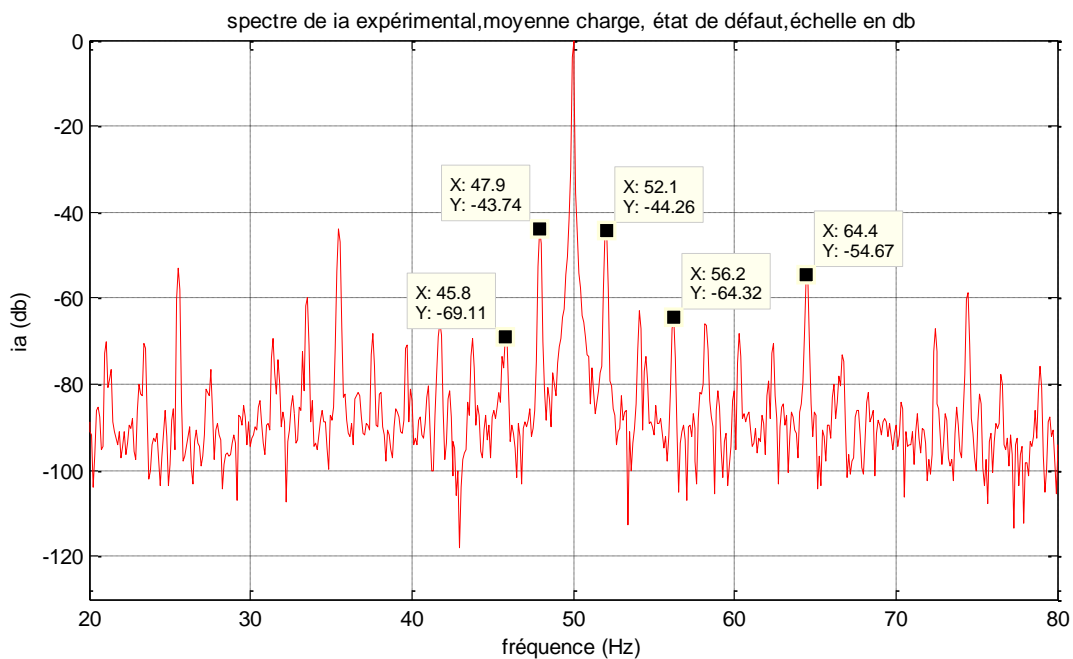


Figures 3.22 Zoom du courant statorique expérimental, moyenne charge, état de défaut

Les ondulations dans le courant statorique à la figure 3.21 sont évidentes et visibles. Le zoom de la figure 3.22 confirme que le signal est déformé, n'est pas sinusoïdal, donc contient d'autres harmonique que le 50 Hz. Par suite, ondulations et déformation prouvent qu'il y a défaut.



Figures 3.23 Spectre du courant statorique expérimental, moyenne charge, échelle linéaire, état de défaut

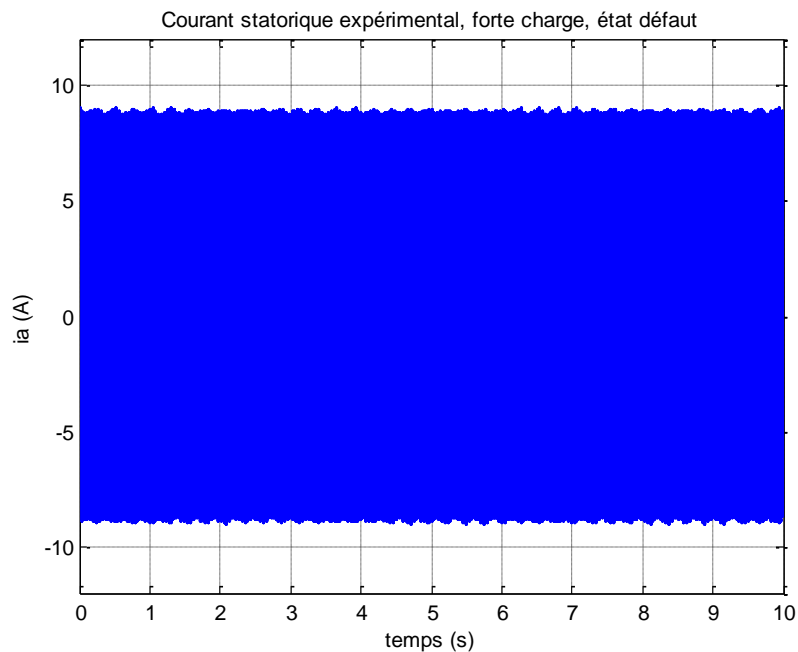


Figures 3.24 Spectre du courant statorique expérimental, moyenne charge, échelle en db, état de défaut

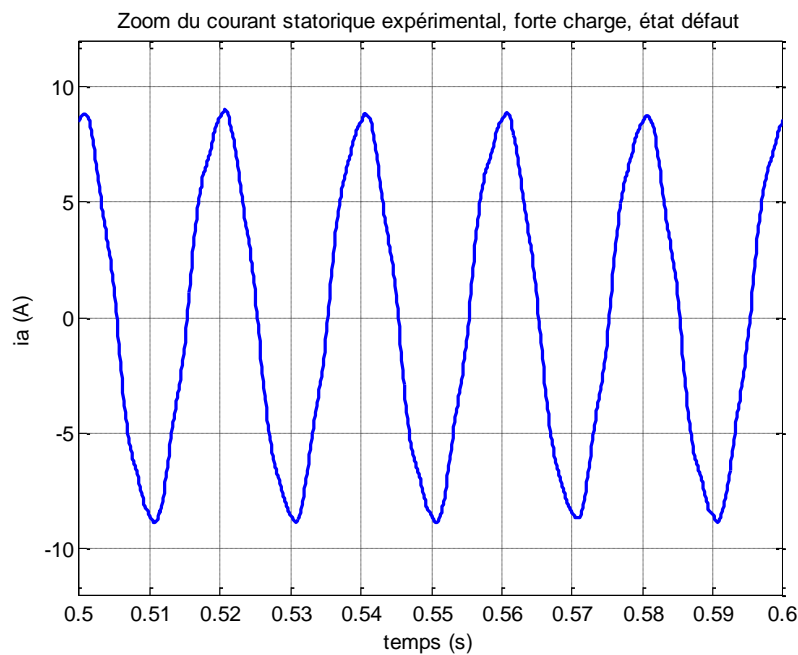
Les spectres du courant pour une charge moyenne sont exposés aux figures 3.23 et 3.24. La première en linéaire montre le fondamental au 50 Hz et beaucoup d'harmonique de défaut de part et d'autre du fondamental qui sont régulièrement espacés. Le premier harmonique à droite a pour fréquence $f_{b+} = 52.1 \text{ Hz}$ et pour amplitude 0.035 (A), la distance qui le sépare du fondamental est $2g f_s = 2.1 \text{ Hz}$. Lorsqu'on observe les autres harmoniques ils sont bien distants de $2g f_s$ comme dans la formule citée auparavant $f_b = (1 \pm 2kg) \cdot f_s$. Les mêmes

remarques sont faites pour la figure 3.24 ci ce n'est que les harmoniques semblent plus grand grâce au logarithme.

3.4.3 État de défaut, une barre cassée forte charge

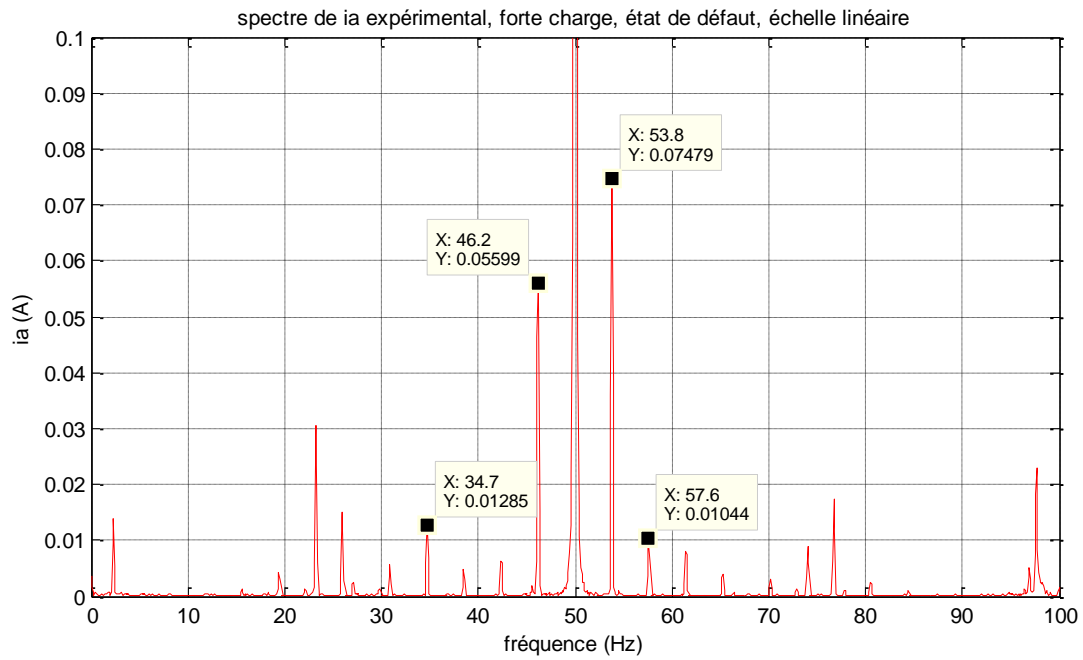


Figures 3.25 Courant statorique expérimental, forte charge, état de défaut

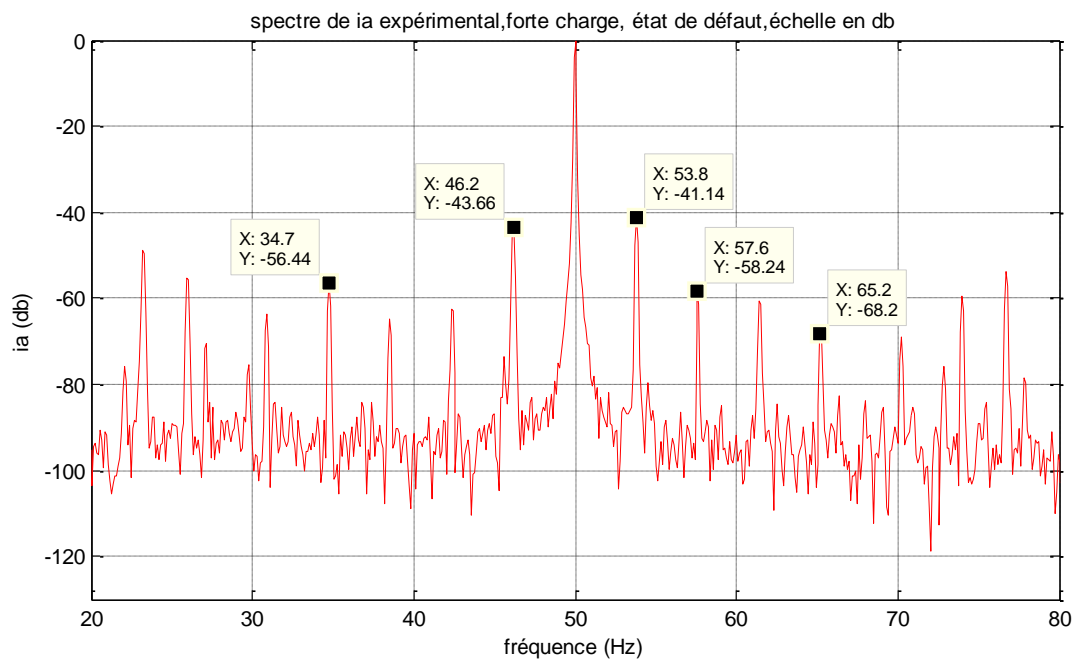


Figures 3.26 Zoom du courant statorique expérimental, forte charge, état de défaut

La figure 3.25 montre que les ondulations se sont resserrées, leur fréquence a donc augmentée.



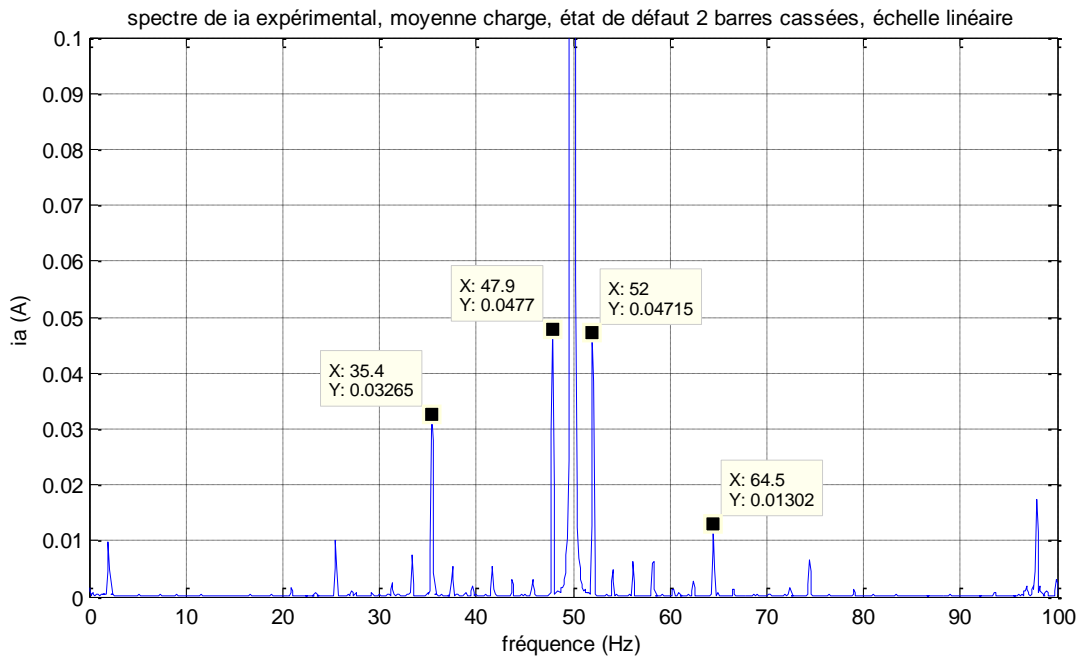
Figures 3.27 Spectre du courant statorique expérimental, forte charge, échelle linéaire, état de défaut



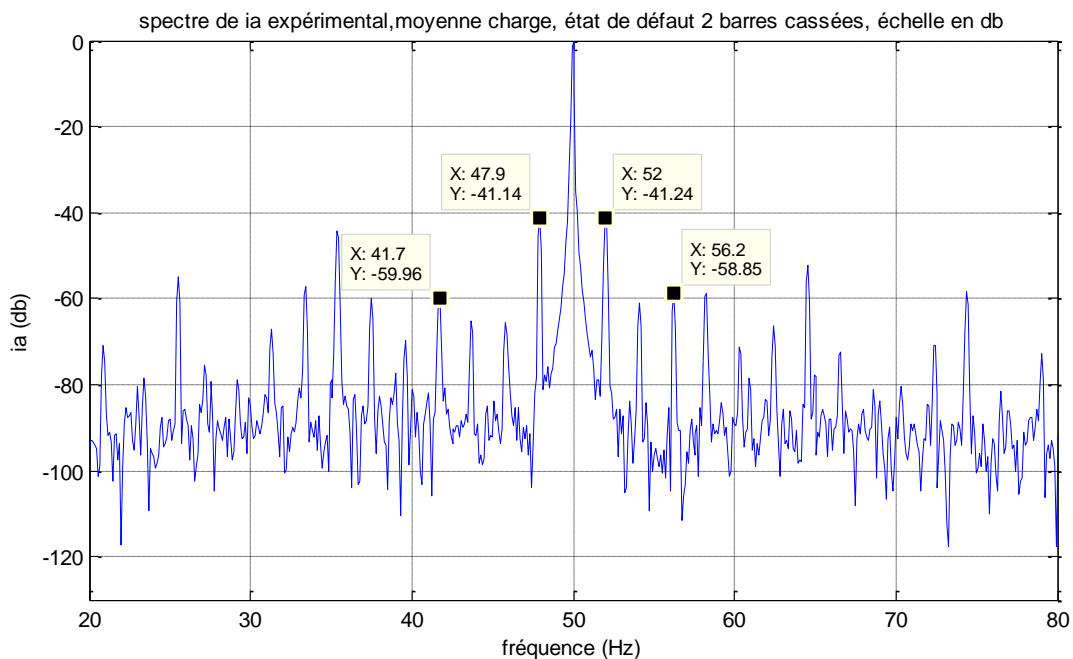
Figures 3.28 Spectre du courant statorique expérimental, forte charge, échelle en db, état de défaut

Le spectre des figures 3.27 et 3.28 montre très clairement l'augmentation des amplitudes des harmoniques de défaut ainsi que la distance qui les sépare sous l'influence de la charge. par conséquent au fur et à mesure que la charge augmente les amplitudes des harmonique de défaut ainsi que la distance qui les sépare augmente. Notons que Le premier harmonique à droite du fondamental a pour fréquence $f_{b+} = 53.8\text{Hz}$ et pour amplitude 0.075 (A), la distance qui le sépare du fondamental est $2g f_s = 3.8\text{Hz}$. Nous faisons alors la remarque que par rapport à la moyenne charge, son amplitude a augmentée ainsi que la distance qui le sépare du fondamental.

3.4.4 État de défaut, deux barres cassées, moyenne charge



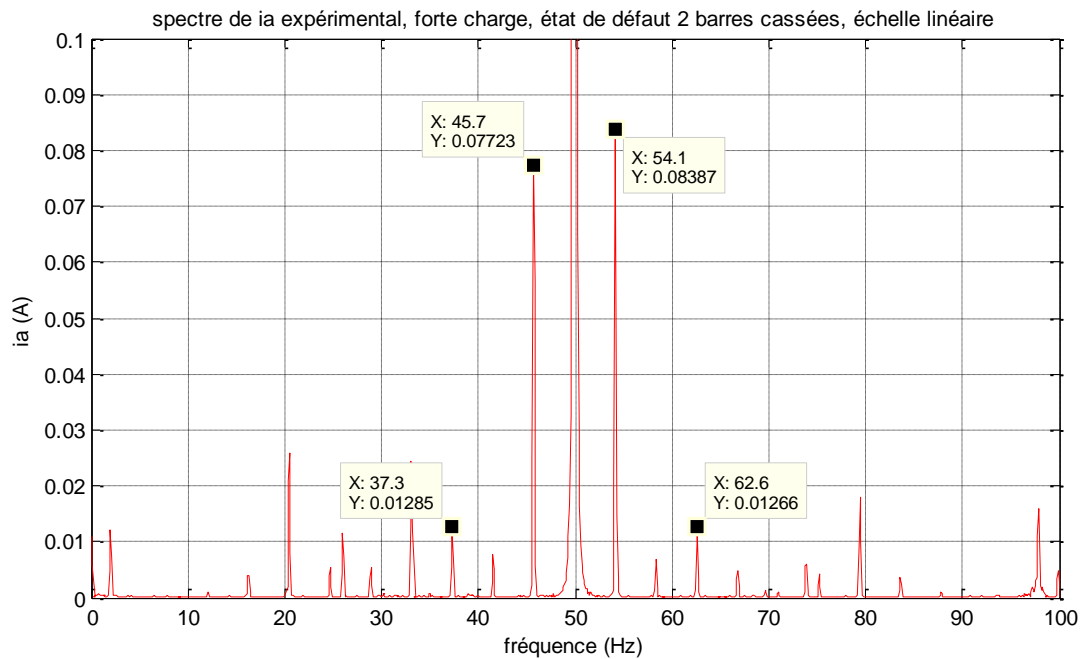
Figures 3.29 Spectre du courant statorique expérimental, moyenne charge, échelle linéaire, état de défaut



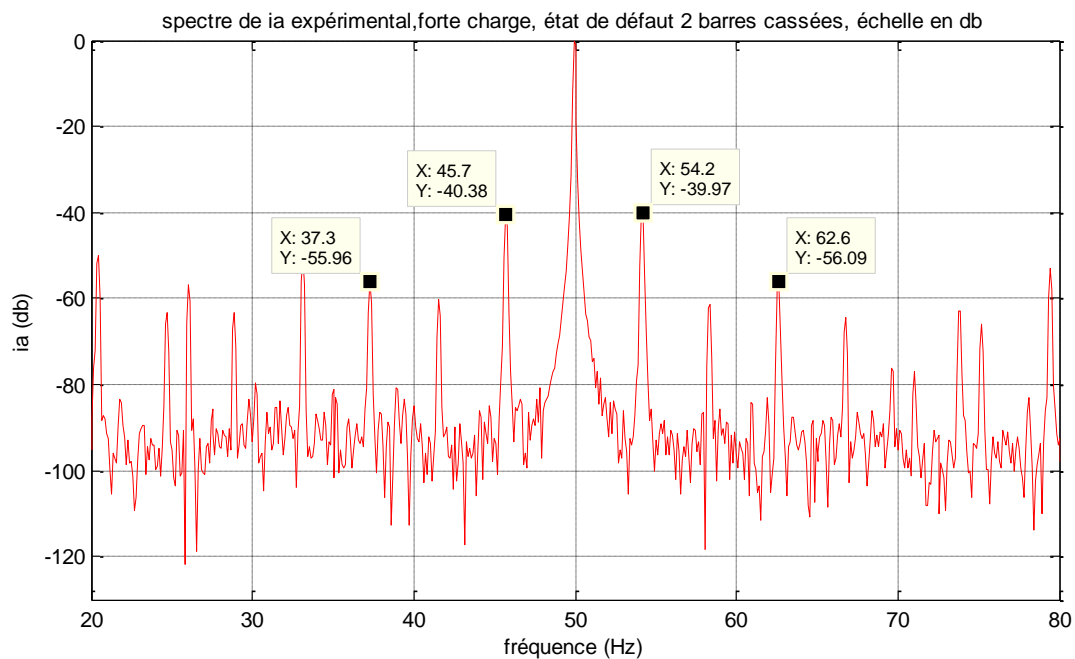
Figures 3.30 Spectre du courant statorique expérimental, moyenne charge, échelle en db, état de défaut

Nous constatons (figures 3.29 et 3.30) que les harmoniques ne se sont pas éloignés du fondamental mais par contre leur amplitude a augmenté par rapport à la même charge moyenne. Toujours pour le premier harmonique nous avons $f_{b+} = 52 \text{ Hz}$ de fréquence et 0.047 (A) d'amplitude. Il y a donc une augmentation due à l'augmentation du nombre de barres cassées.

3.4.5 Forte charge, deux barres cassées



Figures 3.31 Spectre du courant statorique expérimental, moyenne charge, échelle linéaire, état de défaut



Figures 3.32 Spectre du courant statorique expérimental, moyenne charge, échelle en db, état de défaut

Ici les spectres du courant (figures 3.31. et 3.32) pour les fortes charges montrent clairement que les raies de défaut ont vu leur amplitude nettement augmenter ainsi que les distances qui les séparent conformément à la relation évoquée $f_b = (1 \pm 2kg) \cdot f_s$. De plus le premier harmonique a pour fréquence $f_{b+} = 54.2 Hz$ et pour amplitude 0.084 (A).

Enfin pour résumer les constats nous mettons dans un tableau le suivi du premier harmonique à droite du fondamental, faisons la remarque que les mêmes constatations sont observées pour le premier harmonique à gauche du fondamental.

Tab3

1 ^{er} harmonique	1 barre cassée		2 barres cassées	
	Fréquence (Hz)	Amplitude (A)	Fréquence (Hz)	Amplitude (A)
Moyenne charge	52.1	0.035	52	0.047
Forte charge	53.8	0.075	54.2	0.084

3.5 Conclusion

Le but dans ce chapitre est l'analyse spectrale des grandeurs fournies par le modèle réduit issu du modèle multi enroulements afin de confirmer son aptitude à réaliser les mêmes performances que celui dont il découle. Nous avons commencés par simuler le modèle pour la moyenne charge. Les résultats obtenus montrant les spectres des différentes grandeurs sont très satisfaisants. Nous avons pour l'observation utilisé deux échelles l'une en linéaire l'autre en db tout en sachant que l'échelle en db c.à.d. l'échelle logarithmique aide à faire apparaître n'importe quel harmonique se trouvant dans le signal. Ensuite la simulation du modèle pour les fortes charges a été faite dont la conclusion à retenir est qu'au fur et à mesure que la charge augmente les harmoniques augmentent en amplitude et que la distance qui les sépare augmente. Aussi nous pouvons conclure que le modèle réduit donne des résultats semblables au modèle multi enroulements. Pour finir nous avons obtenus des résultats expérimentaux du laboratoire LGEB de Biskra dont les spectres montrés et étudiés confirment la finesse des deux modèles à reproduire le comportement de la machine asynchrone avec ou sans défaut.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le thème de notre travail est l'étude du défaut rotorique ou défaut de cassure de barres grâce au modèle réduit issu du modèle multi enroulements. Pour ce faire, dans le deuxième chapitre, nous avons présentés ce modèle d'une manière brève mais largement suffisante à partir de thèses de doctorats.

Le modèle a été réalisé dans Simulink de Matlab, nous avons procédé à la simulation en commençant par l'état sain. Les résultats obtenus sont semblables à ceux de la littérature.

Le défaut rotorique ou cassure de barre est effectué en augmentant la valeur de la résistance des barres concernées comme citée dans la littérature. La simulation effectuée a permis d'obtenir sur un même graphe un état sain suivi par un autre en défaut. Les résultats obtenus sont plus que satisfaisants. Ils sont en parfaite concordance avec ceux de la littérature, comme cela a été constaté pour toutes les grandeurs sur les figures présentées. Nous avons observés les ondulations dans le courant statorique, le couple électromagnétique, la vitesse de rotation. Ils dévoilent la présence du défaut rotorique, ceci pour un éventail de charges allant des faibles jusqu'aux fortes. Seul le temporel a été montré dans ce chapitre.

Par contre dans le chapitre final le but était l'analyse spectrale des grandeurs fournies par le modèle réduit issu du modèle multi enroulements afin de confirmer son aptitude à réaliser les mêmes performances que celui dont il découle. Nous avons simulé le modèle pour la moyenne et la forte charge. Les résultats obtenus montrant les spectres des différentes grandeurs sont très satisfaisants. Les résultats étaient montrés en deux échelles l'une en linéaire l'autre en db car cette dernière échelle logarithmique aide à faire apparaitre n'importe quel harmonique se trouvant dans le signal. Enfin nous sommes arrivés à la conclusion qu'au fur et à mesure que la charge augmente les harmoniques augmentent en amplitude et que la distance qui les sépare augmente. Aussi nous pouvons conclure que le modèle réduit donne des résultats semblables au modèle multi enroulements. Pour finir nous avons obtenus des résultats expérimentaux du laboratoire LGEB de Biskra dont les spectres montrés et étudiés confirment la finesse des deux modèles à reproduire le comportement de la machine asynchrone avec ou sans défaut.

Bibliographie

- [1]: Didi Mohammed , "Diagnostic des défauts rotoriques de la machine asynchrone par utilisation du module de Park", Mémoire de Magistère, L'Université d'Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued , 2021.
- [2]: Mr. ABDELKEBIR Adel, "Diagnostic d'un moteur à Induction en utilisant la transformée en ondelettes", Mémoire de Magistère, Université mohamed boudiaf - M'sila, 2017.
- [3]: Said Azzedine, "Commande de la Machine Asynchrone par mode glissant", Mémoire de Magistère, Université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2017.
- [4]: Oubiri Mohammed yassine, "Diagnostic de défauts dans la machine à induction triphasée", Mémoire de Magistère ,Université Echahid Hamma Lakhder d'El-Oued, 2022.
- [5]: M. BAZI Smail, "Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur", Thèse doctorat, Université de Batna 2, 08/12/2016.
- [6]: Gahmouche Abdelhak, "Diagnostic de la machine asynchrone par mesure de champ Magnétique de dispersion ", Mémoire de Magistère, Université Mohamed Khider de Biskra, Samedi 6 juillet 2019.
- [7]: Noureddine Bessous, "Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones", Mémoire de Magistère, Université Mentouri de Cnstantine.
- [8]: Samir Ali, "Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par une méthode non invasive ", Mémoire de Magistère, Université mohamed boudiaf - M'sila, 2022.
- [9]: Halem Noura, "Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis", Thèse doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra, 07/04/2015.
- [10]: Maghraoui Abdelwahab, "Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage", Université mohamed boudiaf - M'sila, 2006.

ملخص : تلعب الآلات غير المتزامنة وخاصة المحركات غير المتزامنة دورًا مهمًا في مجال تحويل الطاقة الكهروميكانيكية. على الرغم من حقيقة أن آلة الحث على شكل قفص السنجاب معروفة بأنها أقوى الآلات الكهربائية ، إلا أنها يمكن أن تؤثر على عمرها من خلال التسبب في ظهور أعطال في الجزء الثابت والدوار. الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو تشخيص عطل قضيب الدوار المكسور ، سيتم الكشف عن العيوب من خلال التحليل الطيفي للإشارات التي تم الحصول عليها.

الكلمات المفتاحية : الآلة غير متزامنة. التشخيص. انكسار القضيب. التحليل الطيفي.

Résumé : Les machines asynchrones spécialement les moteurs asynchrones jouent un rôle important dans le domaine de la conversion de l'énergie électromécanique.

Malgré le fait que la machine asynchrone à cage soit réputée pour être la plus robuste des machines électriques, elle peut affecter la durée de vie de celle-ci en faisant apparaître des défauts dans le stator et le rotor.

L'objectif principal de ce mémoire est le diagnostic de défaut de cassure de barre rotorique,

La détection de défauts sera effectuée par l'analyse spectrale des signaux obtenus.

Mots clés : Machine asynchrone, Diagnostic, Cassure de Barres, ASCM, Analyse spectrale.