

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme
D'INGÉNIEUR D'ÉTAT EN ÉLECTROTECHNIQUE

Intitulé

DIAGNOSTIC DE DÉFAUTS ÉLECTRIQUES
ET MÉCANIQUES DE LA MACHINE
ASYNCHRONE À SIMPLE CAGE
D'ÉCUREUIL :
ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Étudié par
Tahar ACHOUR
Tahar ACHOUR

Proposé et dirigé par
O. TOUHAMI Prof. ENP
S. HAMDANI C.C. USTHB

Promotion Juin 2008

*A nos parents,
Nos frères,
Nos soeurs,
Nos proches,
Et à tous nos amis.*

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Monsieur le professeur TOUHAMI pour son encadrement et ses précieux conseils grâce à qui ce travail a vu le jour et Monsieur HAMDANI pour avoir co-encadré ce travail et sa disponibilité.

Nous remercions également les membres du jury qui ont bien voulu examiner notre travail.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à Monsieur OUADAH pour son aide lors des essais effectués au sein du laboratoire de recherche en électrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, son soutien et ses précieux conseils.

Nos remerciements vont aussi à l'équipe de recherche du Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie de Toulouse (LAPLACE) qui nous ont transmis les données des essais effectués pour l'étude des défauts mécaniques.

Merci à tous les enseignants qui ont participé à notre formation, sans oublier tous nos amis et camarades, particulièrement Saïd ATTA pour sa précieuse aide et avec qui nous avons passé nos cinq dernières années.

Résumé

Dans cette étude, nous abordons le diagnostic de défauts électriques et mécaniques de la machine asynchrone à rotor à cage d'écureuil. Les trois premiers chapitres ont permis de présenter la machine asynchrone, les défaillances qu'elle peut présenter, l'état de l'art du diagnostic et les outils de traitement du signal utilisés. Dans l'étude expérimentale, les cassures de barres et portion d'anneau de court-circuit, le désalignement, l'excentricité dynamique et l'effet que peuvent avoir le niveau de charge et les oscillations du couple sur le diagnostic ont fait l'objet d'une étude par l'analyse spectrale du courant statorique.

Mots clefs Machine asynchrone, Diagnostic, Cassure de barres, Cassure de portion d'anneau de court-circuit, Désalignement, Excentricité, Oscillations de couple, Analyse fréquentielle.

Abstract

This study deals with the diagnosis of electrical and mechanical defects of Squirrel-Cage Rotor Induction Motors. The failures of induction motor and the diagnosis methods are presented. Among the methods, Motor Current Signature Analysis (MCSA) is used in the experimental study to detect broken bars and end-ring segment, misalignment, dynamic eccentricity. The load level and the load torque oscillation effects on the diagnosis are also studied.

Keywords Induction motor, Diagnosis, Broken bars, End-ring segment broken, Misalignment, Eccentricity, Torque oscillations, Spectral analysis.

ملخص

في هذه الدراسة تم تشخيص الأعطاب الكهربائية والميكانيكية للمحرك الأتزامي ذو قفص السنجاب بطريقة تحليل طيف التيار الكهربائي. أولاً تم تقديم المحرك الأتزامي و الأعطاب التي قد تصيبه، طرق التشخيص و الأدوات المستخدمة لتحليل الإشارات. أم في الدراسة التجريبية، تم تشخيص إنكسار القضبان و جزء من حلقة الدارة القصيرة، الإختلال المحوري، الإنحراف المركزي الديناميكي و إظهار آثار الحمل و تذبذبات عزم الدوران على عملية التشخيص.

الكلمات المفتاحية المحرك الأتزامي، تشخيص، إنكسار القضبان، إنكسار جزء من حلقة الدارة القصيرة، الإختلال المحوري، الإنحراف المركزي، تذبذبات عزم الدوران، تحليل طيف التيار.

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Table des Figures	viii
Liste des Tableaux	ix
Introduction générale	1
1 Machine asynchrone et ses défaillances	3
1.1 Présentation de la machine asynchrone	3
1.1.1 Stator	4
1.1.2 Rotor	5
1.1.3 Paliers	7
1.1.3.1 Paliers lisses	7
1.1.3.2 Paliers à roulements	7
1.2 Défaillances de la machine asynchrone et leurs origines	8
1.2.1 Défaillances d'ordre électrique	8
1.2.1.1 Défaillances des circuits électriques statoriques	9
1.2.1.2 Défaillances des circuits électriques rotoriques	10
1.2.2 Défaillances d'ordre mécanique	10
1.2.2.1 Défaillances des roulements	10
1.2.2.2 Défaillances du flasque	11

1.2.2.3	Défaillances de l'arbre	12
1.2.3	Effets des défauts mécaniques sur la machine asynchrone	12
1.2.3.1	Oscillation du couple	12
1.2.3.2	Désalignement	12
1.2.3.3	Excentricité	13
2	Etat de l'art du diagnostic	15
2.1	Présentation des différentes méthodes	15
2.2	Approche modèle	16
2.2.1	Diagnostic à l'aide des observateurs	17
2.2.2	Diagnostic par redondance analytique (espace de parité)	17
2.2.3	Diagnostic par estimation paramétrique	18
2.3	Approche signal	18
2.3.1	Surveillance du courant statorique	19
2.3.1.1	Cassures de barres et portion d'anneau de court-circuit	20
2.3.1.2	Défaillances des roulements	21
2.3.1.3	Excentricité dynamique et statique	22
2.3.1.4	Effets de la charge	23
2.4	Conclusion	24
3	Rappels sur le traitement du signal	25
3.1	Types de signaux	25
3.1.1	Signaux déterministes	25
3.1.2	Signaux aléatoires	27
3.2	Transformée de Fourier	27
3.3	Théorème d'échantillonnage	27
3.4	Transformée de Fourier discrète	28
3.5	Estimation spectrale	28
3.5.1	Périodogramme	29
3.5.2	Périodogramme moyenné	29
3.5.3	Utilisation des fenêtres	29

3.5.4	Estimateurs spectraux à variance réduite	30
4	Résultats expérimentaux	31
4.1	Description et présentation des bancs d'essais	31
4.1.1	Banc d'essais pour le diagnostic des défauts électriques	31
4.1.2	Banc d'essais pour le diagnostic des défauts mécaniques	33
4.2	Cassures de barres et de portion d'anneau de court-circuit	35
4.3	Oscillation du couple de charge	40
4.4	Désalignement	42
4.5	Excentricité dynamique	45
4.6	Conclusion	48
	Conclusion générale	49
	Annexes	51
A	Choix des fenêtres	51
A.1	Choix de la fenêtre pour l'analyse spectrale dans le diagnostic des défauts électriques	52
A.2	Choix de la fenêtre pour l'analyse spectrale dans le diagnostic des défauts mécaniques	53
B	Calcul des amplitudes des oscillations de couple et relevés expérimentaux	55
B.1	Calcul des amplitudes des oscillations du couple	55
B.2	Relevés expérimentaux	58
	Bibliographie	69

Table des figures

1.1	Machine asynchrone triphasée[2]	4
1.2	Cage d'écureuil	6
1.3	Répartition détaillée des défauts (EPRI) [4]	9
1.4	Roulement à billes [9]	11
1.5	Types de désalignement [10]	13
1.6	Types d'excentricité	14
2.1	Méthodes analytiques de diagnostic des défauts [12]	16
2.2	Méthodes de diagnostic par les observateurs[17]	17
2.3	Géométrie des éléments d'un roulement à billes [29]	21
3.1	Types de signaux	26
4.1	Banc d'essais ENP	32
4.2	Banc d'essais du laboratoire LAPLACE, ENSEEIHT	33
4.3	Tensions d'alimentation	35
4.4	Vitesses des différents moteurs à 70% de charge	35
4.5	Courant statorique des différentes machines à 70% de charge.	36
4.6	Analyse spectrale du courant statorique à vide	37
4.8	Variations des amplitudes des harmoniques pour les défauts électriques	38
4.7	Défauts électriques : Analyse spectrale du courant statorique à 70% de charge	39
4.8	Oscillation du couple de charge : Analyse spectrale du courant statorique (LTO5)	41
4.9	Variations des harmoniques de courant pour différents niveaux d'oscillation et de charge	42

4.10	Analyse spectrale du courant statorique pour un désalignement angulaire de 2.4 mm à 80% de charge	43
4.11	Analyse spectrale du courant statorique pour un désalignement parallèle de 3.8 mm à 80% de charge	43
4.12	Variations des amplitudes des harmoniques de courant pour différents niveaux et types de désalignement	44
4.13	Excentricité dynamique : Variations des amplitudes des harmoniques de courant pour différents niveaux de charge	46
4.14	Excentricité dynamique : Analyse spectrale du courant statorique	47
A.1	Les différentes fenêtres	51
A.2	Défauts électriques : Choix des fenêtres pour l'analyse spectrale	52
A.3	Défauts électriques : Effet de la longueur de la fenêtre	53
A.4	Défauts mécaniques : Choix des fenêtres pour l'analyse spectrale	54
A.5	Défauts mécaniques : Effet de la longueur de la fenêtre	54
B.1	Densité spectrale de puissance du couple	56
B.2	Couple à 80% de charge	57
B.3	Oscillation du couple de charge : Courant statorique à 80% de charge	58
B.4	Oscillation du couple de charge : Analyse spectrale du courant statorique à 10% de charge	59
B.5	Oscillation du couple de charge : Analyse spectrale du courant statorique à 50% de charge	60
B.6	Oscillation du couple de charge : Analyse spectrale du courant statorique à 80% de charge	61
B.7	Désalignement : Courant statorique à 80% de charge	62
B.8	Désalignement : Analyse spectrale du courant statorique à 10% de charge	63
B.9	Désalignement : Analyse spectrale du courant statorique à 50% de charge	64
B.10	Désalignement : Analyse spectrale du courant statorique à 80% de charge	65
B.11	Excentricité dynamique : Courant statorique à 80% de charge	65

Liste des tableaux

1.1	Répartition des défauts (IEEE, EPRI) [3, 4]	8
2.1	Variations des paramètres suivant les défauts	18
2.2	Fréquences caractéristiques des défaillances des roulements [28]	22
4.1	Défauts électriques : Plaque signalétique de la machine asynchrone	32
4.2	Défauts électriques : Plaque signalétique de la machine à courant continu	33
4.3	Défauts mécaniques : Plaque signalétique de la machine asynchrone	34
4.4	Défauts mécaniques : Plaque signalétique de la machine à courant continu	34
4.5	Amplitudes des harmoniques en dB	38
4.6	Amplitudes des oscillations du couple de charge en N.m	40
4.7	Oscillation du couple de charge : Amplitudes des harmoniques de courant en dB	42
4.8	Désalignement : Amplitudes des oscillations du couple en N.m	44
4.9	Désalignement : Amplitudes des harmoniques de courant en dB	44
4.10	Variation du couple moyen (%) sous l'effet du désalignement	45
4.11	Excentricité dynamique : Amplitudes des harmoniques de courant en dB	45
4.12	Excentricité dynamique : Amplitudes des oscillations du couple en N.m	46
4.13	Effet de l'excentricité dynamique sur le couple moyen	46

Introduction générale

Pour de nombreuses applications industrielles, la demande est de plus en plus croissante pour améliorer la fiabilité et la disponibilité des systèmes électriques. Pour atteindre des niveaux de fiabilité suffisants et assurer la longévité des chaînes de production, on se tourne inévitablement vers la machine électrique la plus robuste qui n'est autre que la machine asynchrone à cage d'écurueil.

Longtemps, elle a été confinée dans le domaine des entraînements électriques à vitesses constantes à cause de la difficulté et la complexité des circuits de commande. Cependant, le développement rapide qu'a connu l'électronique de puissance, ces dernières décennies, a permis de surmonter cette difficulté, ce qui a eu pour conséquence de permettre à la machine asynchrone de s'imposer dans divers domaines d'application, poussant la machine à courant-continu vers des applications restreintes et concurrençant même les machines synchrones dans le domaine des fortes puissances.

Le faible coût de fabrication et la robustesse sont les atouts majeurs de la machine asynchrone. Néanmoins, elle présente quelques défauts inhérents à des erreurs lors de la fabrication ou de l'assemblage ou à l'usure prématurée ou naturelle des différents organes qui la constituent. Le diagnostic prématuré de ces défauts permet d'établir un planning d'entretien, de réparation et constitue un outil d'aide à la décision pour la mise à l'arrêt des machines, n'étant plus suffisamment fiables ou représentant un risque afin d'éviter les ruptures de productions et la dégradation des installations qui entraînent des pertes financières.

En général, deux approches de surveillance et de diagnostic peuvent être utilisées. La première est basée sur le modèle de la machine où les sorties du système réel et du modèle pour une même entrée sont comparées et utilisées pour construire des résidus exploités pour la détection des défauts. Quant à la seconde approche, elle est basée sur l'analyse des

grandeurs accessibles et mesurables de la machine asynchrone. Cette dernière approche est la plus simple à mettre en œuvre, car généralement en industrie les machines sont commandées en vitesse ou en couple où les capteurs utilisés pour ces commandes peuvent également être exploités pour le diagnostic de défauts.

Dans notre travail, l'analyse spectrale du courant statorique de la machine asynchrone est utilisée pour la détection des défauts de cassures de barres ou de portions d'anneaux de court-circuit, d'excentricité dynamique, de désalignement et pour voir l'effet que peuvent avoir le niveau de charge et les oscillations du couple de charge sur le diagnostic. Dans ce but, notre mémoire est composé de quatre chapitres.

Le premier chapitre, concerne la présentation de la machine asynchrone à cage d'écureuil en donnant les différentes parties qui la composent et les défaillances qu'elle peut présenter.

Au second chapitre, l'état de l'art du diagnostic est abordé en présentant les différentes approches pouvant être utilisées dans le diagnostic. On s'attardera sur la méthode MCSA (Motor Current Signature Analysis) qui sera utilisée dans notre étude expérimentale et les différentes fréquences du spectre du courant statorique caractérisant les défauts.

Le troisième chapitre est un bref rappel sur les différents outils utilisés en traitement de signal pour l'étude expérimentale de la machine asynchrone.

Enfin dans le dernier chapitre, nous décrivons les bancs d'essais utilisés pour le diagnostic des défauts électriques et mécaniques. Les résultats expérimentaux obtenus sont également présentés et discutés.

Nous terminons par une conclusion générale sur les objectifs assignés.

Chapitre 1

Machine asynchrone et ses défaillances

La machine asynchrone, connue également sous le terme anglo-saxon induction machine, est une machine à courant alternatif polyphasée ne disposant d'aucune connexion entre son rotor et son stator. L'interaction entre le champ créé par l'inducteur (généralement le stator) et le courant induit au niveau du bobinage ou bien des barres, selon le type de machine, de l'induit (généralement le rotor) engendre le couple électromagnétique. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui la traversent.

Les machines asynchrones ont longtemps été fortement concurrencées par les machines synchrones dans les domaines de forte puissance mais avec l'avènement de l'électronique de puissance on les retrouve dans diverses applications et domaines.

Dans ce chapitre, nous présentons les différents constituants de la machine asynchrone et les défauts qu'elle peut présenter.

1.1 Présentation de la machine asynchrone

Généralement les machines tournantes sont toutes constituées d'une partie fixe et d'une partie tournante, la machine asynchrone ne déroge pas à cette règle cependant ses constituants présentent quelques singularités et dans ce qui suit nous présentons les différents éléments qui la constitue et pouvant être classés comme suit [1, 2] :

- le stator : partie fixe de la machine ;
- le rotor : partie mobile ;
- paliers : organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.

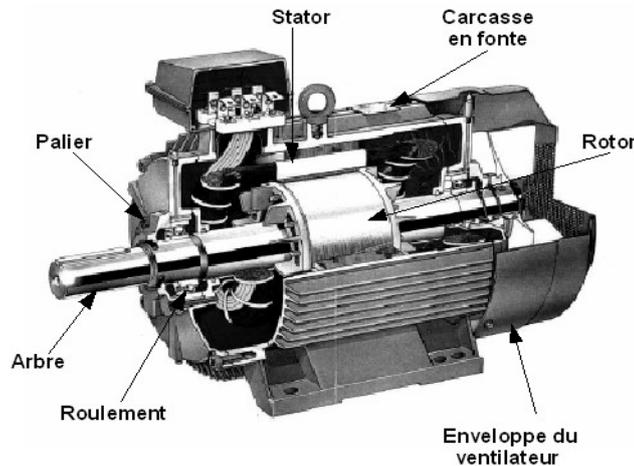


FIG. 1.1 – Machine asynchrone triphasée[2]

1.1.1 Stator

Le stator de la machine asynchrone est composé de différentes parties, dont on présente les caractéristiques et le rôle ci-dessous.

Carcasse : la carcasse sert de support, joue le rôle d'enveloppe, assure la protection contre les agents extérieurs et guide l'air de ventilation ; elle agit aussi parfois comme échangeur thermique. Elle peut être réalisée en métal coulé (fonte, acier ou aluminium) dans le cas des petites machines, par exemple le moteur asynchrone à ailettes de refroidissement. Pour des puissances plus importantes, supérieures à quelques centaines de kilowatts, la construction mécano soudée s'impose, réalisée en tôles d'acier découpées, cintrées et soudées. Les carcasses sont étudiées pour recevoir le circuit magnétique bobiné et, éventuellement, un échangeur thermique, incorporé ou non, et des paliers flasques.

Circuit magnétique : le circuit magnétique a pour principale rôle la canalisation des lignes d'induction magnétiques, le maintien des conducteurs du bobinage et la conduction thermique des conducteurs vers les zones de refroidissement. Le circuit magnétique doit donc présenter à la fois des propriétés magnétiques, des ca-

ractéristiques mécaniques déterminées et une bonne conductivité thermique.

Les pertes les plus importantes au niveau du circuit magnétique sont les pertes fer par hystérésis et par courants de Foucault afin de les réduire, le circuit magnétique est généralement fait de fines tôles au silicium d'épaisseur inférieure à 1 mm. Les pertes massiques sont d'autant plus faibles que la teneur en silicium est élevée, en revanche, la perméabilité magnétique diminue avec l'augmentation de cette teneur.

Enroulement statorique : l'enroulement statorique, généralement de type polyphasé, est constitué de conducteurs répartis dans des encoches réalisées sur la tôle magnétique débouchant sur l'entrefer. Selon la répartition des conducteurs à l'intérieur des encoches on peut réaliser :

- un bobinage en un étage, où tous les conducteurs d'une encoche appartiennent à une même phase, utilisé pour les machines de faible puissance ou pour des applications spécifiques ;
- un bobinage en deux étages, où tous les conducteurs d'un étage situés dans une encoche appartiennent à une même phase et sont reliés électriquement en série ; suivant la valeur du pas de bobinage, il peut arriver que deux phases cohabitent dans la même encoche ; ces bobinages sont du type imbriqué ou ondulé (suivant le type de la machine et le constructeur) et sont couramment utilisés dans les machines de moyenne et forte puissance.

1.1.2 Rotor

Le rotor des machines asynchrone est généralement constitué : d'un arbre qui supporte un circuit magnétique dont le rôle est similaire à celui du circuit magnétique statorique et un bobinage ou bien une cage d'écureuil. Les différents types de machines asynchrones se distinguent que par leurs rotor qui peut être bobiné ou bien à cage. Ce dernier sera présenté ci-dessous.

Arbre : l'arbre de la machine électrique, supporté par un ou plusieurs paliers, est un organe de transmission du mouvement de rotation et sert de support au corps du rotor, au circuit magnétique et aux enroulements tournants. L'arbre est en acier moulé ou forgé dont les caractéristiques mécaniques sont choisies après avoir déterminé les

contraintes maximales qui apparaissent lors des efforts permanents ou accidentels qui peuvent être classées en quatre catégories :

- les efforts de flexion qui résultent des effets de la pesanteur, de la force centrifuge qui s'exerce sur l'arbre lui-même et sur les organes qu'il supporte, de l'attraction magnétique radiale différentielle et des forces extérieures éventuelles ;
- les efforts de torsion qui ont principalement pour origine le couple électromécanique transmis ;
- les efforts radiaux et tangentiels locaux qui ont pour cause la force centrifuge qui s'exerce sur l'arbre lui-même et sur les organes qu'il supporte ;
- les efforts axiaux de traction et de compression dus soit à l'action de la pesanteur pour les machines verticales, soit aux réactions axiales de la machine accouplée.

Cage d'écureuil : la cage est constituée de barres conductrices, régulièrement réparties, court-circuitées à leurs extrémités par deux anneaux conducteurs, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil (Figure 1.2). Les cages sont généralement coulées directement dans les encoches rotoriques et sont en cuivre ou en laiton pour les machines de grandes puissances et fait d'aluminium coulé sous pression pour la basse et moyenne puissance. Bien que la cage soit coulée directement dans les encoches faites au niveau du circuit magnétique, donc présentant peu ou pas d'isolation par rapport à ce dernier, les courants de fuite restent faibles sauf dans le cas de rupture de barres. Les rotors à cage présentent, relativement aux rotors bobinés, les avantages suivants :

- démarrage de la machine sans avoir recours à un rhéostat ;
- une petite réactance de fuite donc un meilleur facteur de puissance ;
- un meilleur rendement, à condition que la résistance de la cage ne soit pas augmentée.



FIG. 1.2 – Cage d'écureuil

1.1.3 Paliers

Les paliers ont pour rôle de soutenir le rotor et permettre sa libre rotation, les déplacements axiaux sont bloqués par un calage longitudinal sur l'un des paliers, sur le second palier ces déplacements sont laissés libre pour compenser la dilatation thermique de l'arbre. Les dissymétries des réluctances du circuit magnétique engendrent des courants dans l'arbre qui sont éliminés par isolation électrique de l'un des paliers par une feuille isolante. On distingue deux types de paliers :

- Paliers lisses ;
- Paliers à roulements.

1.1.3.1 Paliers lisses

Ces types de paliers comportent deux parties principales qui sont le corps de palier et le coussinet :

Corps de Palier Le corps de palier constitue le bâti et le support du coussinet, dans les paliers flasques il est généralement fixé sur la carcasse et dans le cas des paliers pieds, utilisés pour les machines de grandes dimensions et de masses supérieures à 20t, il est désolidarisé de la carcasse.

Coussinets Selon le diamètre de l'arbre, le coussinet peut être une simple douille en cuivre (pour les diamètres d'axe inférieur à 80mm) ou bien réalisé en deux pièces (dans le cas des diamètres supérieurs à 80mm) et est généralement monté sur rotule dans le corps de palier. Les coussinets sont faits de fonte ou d'acier moulé et la surface interne est recouverte d'alliage antifricition.

1.1.3.2 Paliers à roulements

Les paliers à roulement sont utilisés dans le cas des machines de masse inférieure à 20t. Leurs avantages vis-à-vis des paliers lisses sont un faible encombrement, donc réduction de la longueur de la machine, réduction des pertes par frottement et de faibles jeux et usures mais présente une sensibilité aux vibrations et aux surcharges accidentelles.

1.2 Défaillances de la machine asynchrone et leurs origines

La machine asynchrone s'est imposée par rapport aux autres types de machines grâce à sa robustesse et son faible coût de fabrication, néanmoins elle peut présenter parfois des défauts mécaniques ou électriques pouvant toucher ses différents organes.

Différentes études statistiques ont été effectuées afin de déterminer la répartition des pannes dans les différentes parties des machines, les résultats des études les plus significatives [3, 4] sont donnés dans le tableau suivant (Tab.1.1) :

Défauts	IEEE	EPRI
Roulements	44%	41%
Stator	26%	36%
Rotor	8%	9%
Autres	22%	14%

TAB. 1.1 – Répartition des défauts (IEEE, EPRI) [3, 4]

Selon l'étude effectuée par l'EPRI (Electric Power Research Institute) sur des machines utilisées pour différentes applications dans de multiples domaines industriels, la Figure 1.3 donne la répartition détaillée des différents défauts.

D'autres études [5, 6] ont montré que le taux de défauts de roulements est plus grand dans le cas des machines de forte puissance (100kW à 1MW) et cela s'explique par des contraintes mécaniques importantes appliquées aux machines de cette gamme de puissance. Avec le développement des isolants électriques entre 1973 et 1988 les pannes au stator ont diminué de manière significative; elles sont passées de 78% à 60%, alors que les pannes au rotor ont augmenté de 12% à 22%.

1.2.1 Défaillances d'ordre électrique

Les défaillances d'ordre électrique sont des défauts qui touchent les parties électriques de la machine. Elles peuvent affecter aussi bien le bobinage dans le stator que la cage d'écureuil au niveau du rotor.

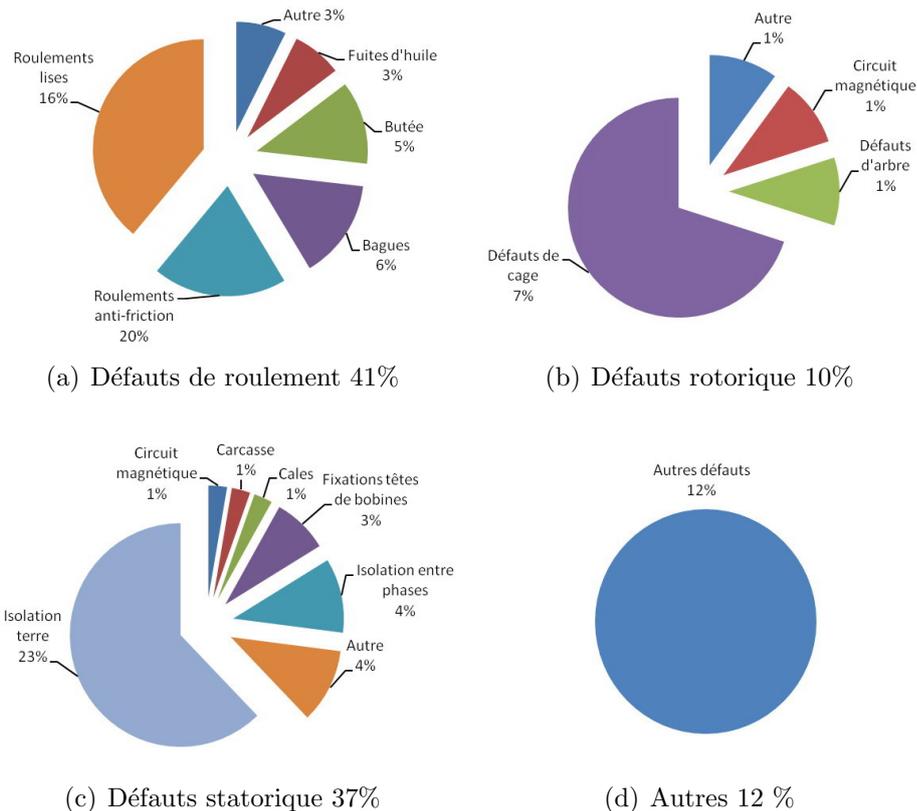


FIG. 1.3 – Répartition détaillée des défauts (EPRI) [4]

1.2.1.1 Défaillances des circuits électriques statoriques

Les défaillances des circuits électriques statoriques peuvent avoir diverses origines. A titre d'exemples, on peut citer :

- rupture d'isolation,
- les courts-circuits entre phases : provoquent un arrêt net de la machine,
- les courts-circuits entre phase et neutre : provoquent un déséquilibre des phases,
- les courts-circuits inter-spires : ce sont les plus couramment rencontrés et les plus nuisibles, ils se produisent à l'intérieur des encoches,
- rupture des connexions.

Ces défauts ont généralement pour cause principale le vieillissement prématuré des isolants dû aux vibrations et échauffements excessifs de la machine ainsi qu'aux surtensions provoquées par les circuits de commande [7].

Ces types de défaillances entraînent :

- un changement de la densité de flux magnétique dans l'entrefer,
- un changement de la signature du courant statorique,

- un changement de la fonction de transfert de la machine,
- des vibrations,
- un échauffement de la machine.

1.2.1.2 Défaillances des circuits électriques rotoriques

Ces défaillances sont des ruptures totales ou partielles d'une ou plusieurs barres ou d'une portion d'anneau de court-circuit de la cage d'écureuil. Parmi les causes entraînant ces défaillances, on peut citer [7, 8] :

- surcharge de la machine,
- démarrages trop fréquents induisant des courants élevés dans les barres ou dans les segments d'anneaux,
- contraintes mécaniques causées par des forces électromagnétiques ou des vibrations mécaniques excessives,
- utilisation de la machine dans un environnement hostile (Industrie chimique).

La cassure d'une barre ou d'une portion d'anneau n'entraîne pas l'arrêt immédiat de la machine mais cela cause [7] :

- un changement de la signature du courant de ligne,
- un changement de la signature de la tension,
- un changement de la densité de flux magnétique dans l'entrefer,
- des vibrations,
- des fluctuations de la vitesse,
- un échauffement de la machine.

1.2.2 Défaillances d'ordre mécanique

1.2.2.1 Défaillances des roulements

Les roulements sont l'une des causes les plus importantes des défaillances des machines tournantes [3, 4]. Ils se composent généralement de (Fig.1.4) :

- de deux bagues : une bague intérieure et une bague extérieure,
- de corps roulants permettant la rotation relative de ces deux bagues,
- d'une cage séparant les corps roulants.

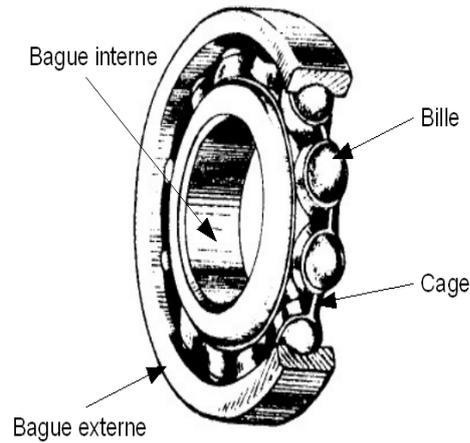


FIG. 1.4 – Roulement à billes [9]

Les roulements peuvent présenter les défauts suivants [7] :

- 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.

Une mauvaise lubrification, des contraintes radiales et axiales importantes, un mauvais positionnement durant l'assemblage ou un désalignement peuvent causer ces défaillances.

Comme incidences sur la machine, on peut citer :

- les oscillations du couple de charge,
- les vibrations et échauffements excessives,
- changement de la signature du courant.

1.2.2.2 Défaillances du flasque

Lors de la construction de la machine, un mauvais positionnement des flasques engendre une excentricité de la partie tournante de la machine. Les principaux symptômes de ce type de défaut sont des vibrations excessives de la machine et la modification de la signature du courant.

1.2.2.3 Défaillances de l'arbre

Ces défaillances ont pour cause des fissures sur l'arbre dues à un mauvais choix du matériau ou une mauvaise construction de la machine. Sous l'action des différentes contraintes mécaniques, dynamiques, résiduelles, thermiques, électromagnétiques et environnementales, les fissures peuvent entraîner la fracture nette de l'arbre provoquant l'arrêt immédiat de la machine.

D'autre part, l'utilisation de la machine dans des milieux corrosifs entraîne l'apparition de microfissures pouvant conduire à la destruction de la machine. Les différents défauts d'excentricité peuvent aussi entraîner la fatigue de l'arbre en induisant des efforts supplémentaires.

La défaillance de l'arbre introduit des vibrations supplémentaires et des harmoniques de courant [7].

1.2.3 Effets des défauts mécaniques sur la machine asynchrone

Les différentes défaillances mécaniques de la machine asynchrone peuvent avoir diverses conséquences, parmi celles-ci on peut citer les oscillations du couple, l'excentricité et le désalignement du rotor qu'on présente dans ce qui suit.

1.2.3.1 Oscillation du couple

Une anomalie dans la charge mécanique (variation ou déséquilibre de la charge, désalignement de l'axe, problème de couplage mécanique), un défaut de la boîte de vitesse ou des roulements peuvent entraîner des oscillations de couple et par conséquent des oscillations de vitesse.

1.2.3.2 Désalignement

Le désalignement peut être interne suite à un mauvais assemblage de la machine ou une défaillance des roulements, ou bien externe dû à un mauvais couplage mécanique. Et cela a pour conséquence sur la machine l'augmentation des vibrations, ce qui entraîne l'usure prématuré de divers composants et peut même quelquefois entraîner de grave dommage.

Généralement les machines peuvent supporter un léger désalignement mentionné par la tolérance d'alignement fournie par le constructeur.

On distingue trois types de base du désalignement :

- le premier type de désalignement est le désalignement parallèle représenté sur la figure 1.5(a), qui existe lorsque les deux axes sont excentrés parallèlement et cela, horizontalement, verticalement ou bien une combinaison des deux ;
- le second type est le désalignement angulaire représenté sur la figure 1.5(b), ce type existe lorsque les deux axes sont obliques, donc forment un angle et cela, peut être sur le plan vertical ou horizontal mais le cas le plus rencontré est la combinaison des deux ;
- le troisième type est la combinaison des deux premiers types comme le montre la figure 1.5(c).

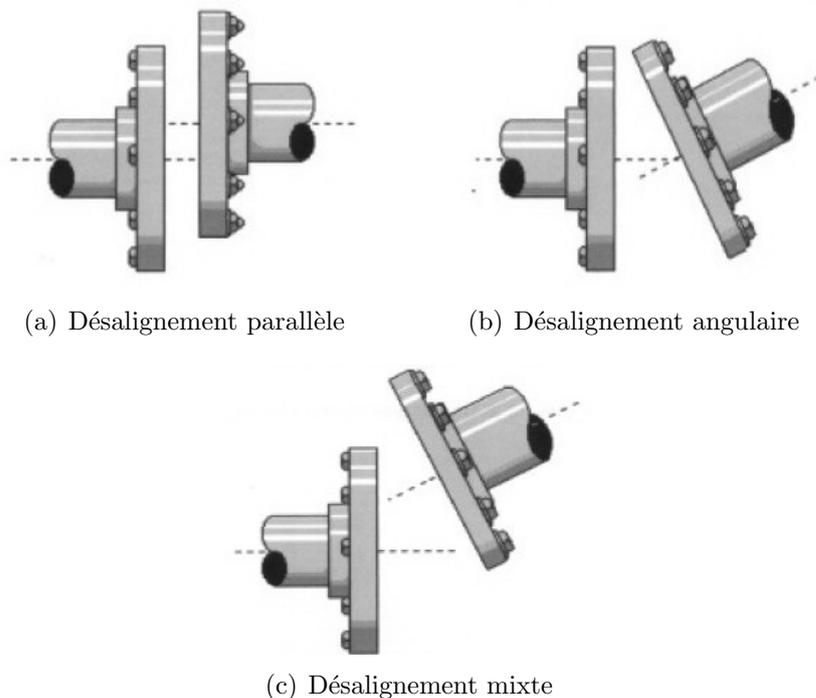


FIG. 1.5 – Types de désalignement [10]

1.2.3.3 Excentricité

En plus du défaut d'oscillation du couple ou de désalignement, les défauts mécaniques peuvent engendrer un déplacement du centre du rotor par rapport au stator ou des déformations du rotor qui ont pour conséquence une non uniformité de l'entrefer, c'est

à dire une excentricité du rotor. On distingue généralement trois types d'excentricité (Fig.1.6) [11] :

excentricité statique : Le centre géométrique du rotor est confondu avec le centre de rotation, mais il est déplacé par rapport au centre géométrique du stator. Cela peut être causé par un mauvais positionnement du stator ou du rotor lors de l'assemblage ou bien à cause d'une déformation du rotor ou du stator.

excentricité dynamique : Le centre géométrique du rotor est différent du centre de rotation et ce dernier est confondu avec le centre géométrique du stator. Cela peut être causé par différents facteurs comme les tolérances de fabrication, utilisation de roulement, désalignement, résonance mécanique aux vitesses critiques, mauvaise construction des différentes pièces de la machine. Le mouvement giratoire du rotor pour des vitesses critiques est une autre source de ce type d'excentricité et il a une importante considération dans le cas d'axes flexibles ou courbés.

excentricité mixte : c'est la combinaison des deux excentricités précédemment cités.

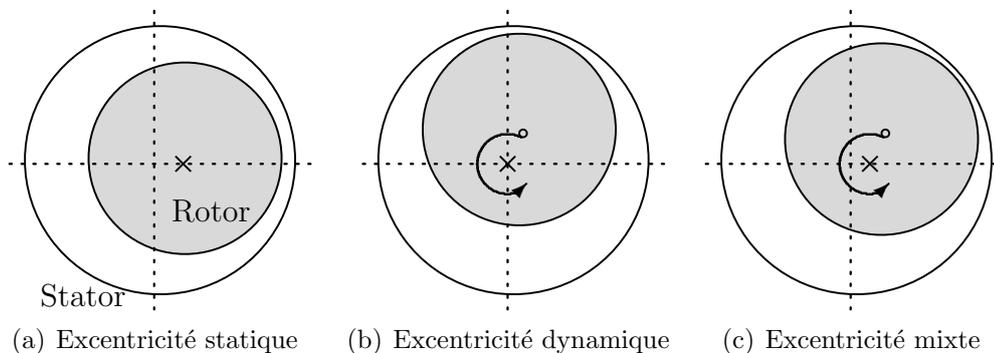


FIG. 1.6 – Types d'excentricité

Le risque d'une grande excentricité est le contact mécanique entre le rotor et le stator, ce qui entraînerait des dommages considérable à la machine.

Chapitre 2

Etat de l'art du diagnostic

Les différents défauts présentés précédemment provoquent généralement des couples pulsatoires, des fluctuations de vitesse, l'augmentation du bruit et des vibrations, changement de la signature du courant, échauffement et variation des paramètres électriques. C'est pour cela que le diagnostic des machines asynchrones est souvent basé sur la surveillance de ces indicateurs.

Deux approches différentes peuvent être utilisées, le diagnostic basé sur des algorithmes d'observations (approche modèle) et celui basé sur le traitement des signaux mesurables (approche signal).

Dans ce chapitre, nous donnerons un aperçu sur l'état de l'art du diagnostic en présentant les différentes méthodes utilisées. On mettra l'accent sur la méthode que nous utiliserons dans notre étude et qui est la méthode MCSA (Motor current signature analysis) basée sur l'analyse spectrale du courant statorique. Dans ce but, les différentes fréquences engendrées par différents défauts électriques et mécaniques seront données.

2.1 Présentation des différentes méthodes

Un système de diagnostic de défauts consiste en trois étapes :

- la détection (décider que le système est en défaut ou non) ;
- la localisation (déterminer quelle partie du système est affectée) ;
- l'identification (estimer l'ampleur et le type des défauts).

L'approche traditionnelle consiste à ajouter des capteurs pour obtenir des informations supplémentaires sur l'état du système : c'est la redondance matérielle. L'inconvénient principal est le coût additionnel en équipement et en maintenance. Par opposition la redondance analytique consiste à développer des algorithmes de détection et localisation des défauts en utilisant les mesures disponibles sur le système. Ces algorithmes peuvent être ou non basés sur un modèle du système. Ils doivent bien sûr tenir compte des variations normales du comportement du système, des bruits de mesures, des perturbations externes ainsi que des erreurs de modélisation, pour éviter les fausses alarmes ou les manques à la détection.

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses et variées car elles correspondent à la diversité des problèmes rencontrés. Sur un problème un peu complexe, il n'est d'ailleurs pas rare de devoir utiliser plusieurs méthodes qu'on peut classer selon le schéma de la Figure 2.2.

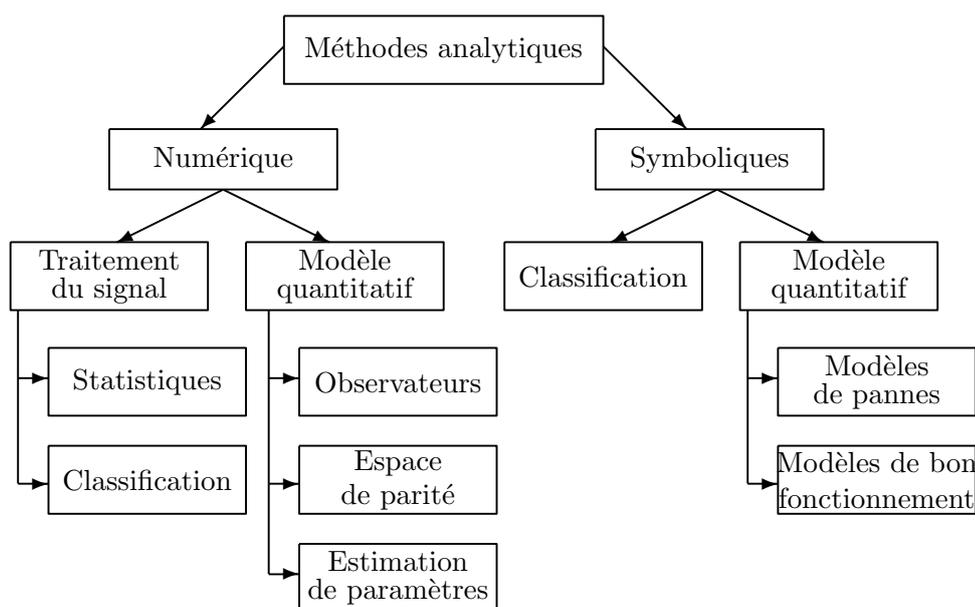


FIG. 2.1 – Méthodes analytiques de diagnostic des défauts [12]

2.2 Approche modèle

Cette méthode est basée sur l'estimation des signaux non mesurables ou sur le suivi des paramètres durant le fonctionnement [13, 14, 15, 16]. Elles supposent une connaissance approfondie du procédé sous forme de modèle numérique. Dans le cas de la machine asyn-

chrone, une modélisation dans le référentiel triphasé ou biphasé équivalent est nécessaire. Des paramètres (mécaniques ou électriques) de ces modèles sont relevés et utilisés pour avoir une signature des défauts. On teste la cohérence entre les mesures et les calculs des modèles par des grandeurs caractéristiques de l'état du procédé, appelées résidus. Le vecteur des résidus, nul en fonctionnement normal, est comparé en ligne aux signatures de pannes. Selon ce mécanisme de diagnostic, on distingue :

- le diagnostic par les observateurs [17] ;
- le diagnostic par redondance analytique (espace de parité) ;
- le diagnostic par estimation paramétrique [18, 19, 20].

2.2.1 Diagnostic à l'aide des observateurs

Le principe de cette méthode est d'utiliser les erreurs d'estimation sur les sorties comme résidus. L'objectif est de construire des résidus structurés c'est-à-dire menant à la localisation des défauts. Dans certains cas l'utilisation de plusieurs observateurs, mis en batterie, peut être nécessaire pour garantir la localisation des défauts.

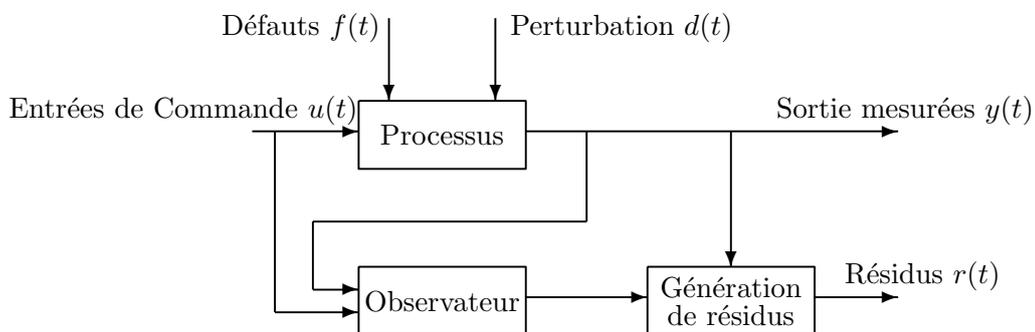


FIG. 2.2 – Méthodes de diagnostic par les observateurs[17]

2.2.2 Diagnostic par redondance analytique (espace de parité)

Comme pour les observateurs, la redondance analytique et la projection dans l'espace de parité sont basées sur l'exploitation des résidus issus du modèle de bon fonctionnement. La philosophie de cette approche est d'exploiter la redondance analytique existant dans les équations d'état lorsque celles-ci sont écrites sur un horizon d'observation. Le vecteur de résidus est alors généré en projetant les mesures observées sur cet horizon dans un espace appelé espace de parité [21].

2.2.3 Diagnostic par estimation paramétrique

La détection et la localisation des défaillances par estimation paramétrique consiste à identifier les paramètres physiques (ou structuraux lorsque les grandeurs physiques ne sont pas accessibles) contenus dans le modèle de connaissance du système. Ce modèle mathématique doit contrairement au cas précédent, pouvoir caractériser les fonctionnements sains et en présence de défaut. Un défaut étant à l'origine d'une variation paramétrique, l'estimation des paramètres du modèle permet d'indiquer la présence d'un déséquilibre dans la machine. Quant aux algorithmes d'identification paramétrique, ils doivent respecter deux contraintes très restrictives et fortement corrélées :

- une excitation persistante très riche, difficilement compatible avec un procédé en fonctionnement ;
- un nombre limité de paramètres à estimer.

Comme exemple, on peut citer le suivi des paramètres électriques de la machine asynchrone qui permet de détecter des défauts rotorique [20] et des courts-circuits statorique. Le tableau 2.1 présente les variations des paramètres du modèle de la machine asynchrone suivant les défauts. Tous les paramètres changent dans le cas d'un défaut. Lors d'un court-circuit entre spires de la phase statorique a , alors que R_{sb} , L_{fsb} , R_{sc} et L_{fsc} augmentent, R_{sa} et L_{fsa} diminuent. Cela permet de donner des informations pour la localisation du défaut.

Types de défauts	Paramètres du modèle de Park				Paramètres du modèle triphasé							
	R_r	R_s	L_r	L_{fs}	R_{sa}	R_{sb}	R_{sc}	L_{fsa}	L_{fsb}	L_{fsc}	R_r	L_r
Barres et portions d'anneaux de courts-circuits cassés	↗	↘	↘	↘								
court-circuit statorique entre spires	↘	↗	↘	↘	R_{sa} L_{fsa}				↘			
					R_{sb} R_{sc} L_{fsb} L_{fsc}				↗			

TAB. 2.1 – Variations des paramètres suivant les défauts

2.3 Approche signal

Le principe des méthodes d'analyse des signaux repose sur l'existence de caractéristiques propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé. L'apparition d'un défaut étant à l'origine de nombreux phénomènes tels que le bruit, l'échauffement et

les vibrations. Ces symptômes sont la manifestation apparente d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles des grandeurs électriques et mécaniques.

Les grandeurs accessibles et mesurables d'une machine asynchrone pouvant être utilisées pour le diagnostic sont :

- les courants absorbés,
- le flux de dispersion,
- les tensions d'alimentation,
- la tension du neutre (neutre alimentation - neutre machine),
- le couple électromagnétique,
- la vitesse rotorique,
- les vibrations.

Les outils de traitement du signal font appel à des méthodes statistiques (changement de moyenne, rupture de modèle, analyse spectrale [11], analyse temps-fréquence [22, 23], ondelettes [24]) ou bien à des méthodes de reconnaissance de formes [25] qui permettent de classer les signatures de défauts. Il faut dans ce cas disposer de suffisamment d'expériences pour pouvoir constituer une base d'apprentissage. C'est dans ce cadre qu'entrent les réseaux de neurones. Les approches de classification se retrouvent également si l'on caractérise les situations avec des attributs symboliques.

Dans notre travail on utilisera l'analyse spectrale du courant statorique pour le diagnostic des défauts mécaniques (excentricité dynamique, désalignement et l'étude de l'effet des oscillations du couple de charge) et électriques (cassure de barres et portion d'anneaux de court-circuit).

2.3.1 Surveillance du courant statorique

La méthode MCSA (Motor current signature analysis) est la méthode de diagnostic la plus largement utilisée pour la détection des défauts mécaniques et électriques. Cela est principalement dû à la facilité de la mesure du courant et aux informations que peut donner son spectre pour différentes défaillances de la machine. Dans cette section, on va donner les différentes signatures qu'engendrent les différents défauts sur le courant statorique.

2.3.1.1 Cassures de barres et portion d'anneau de court-circuit

En fonctionnement normal, avec une alimentation triphasée du moteur de fréquence f_s , il y aura création d'un champ tournant à la vitesse du synchronisme qui peut être direct ou inverse et si le système est parfaitement équilibré le champ résultant sera direct dans l'entrefer. Ce champ direct induit des courants dans la cage rotorique à la fréquence de glissement $g \cdot f_s$. Cependant, toute dissymétrie d'alimentation ou d'impédances statoriques génère un champ résultant inverse donc le champs résultant sera composé du champ direct et inverse.

Les courants dans la cage rotorique produisent un champ magnétique triphasé avec le même nombre de pôles et de même direction que le champ statorique mais avec la fréquence de glissement $g \cdot f_s$. Une dissymétrie due à un défaut de la cage (barres ou portion d'anneau de court-circuit) va engendrer un champ tournant inverse à la fréquence de glissement. Il en résulte, un courant supplémentaire induit au niveau du bobinage statorique de fréquence $f_{sb} = f_s(1 - 2g)$ Hz.

Cela produira une variation cyclique du courant qui engendrera un couple oscillatoire à la fréquence $2gf_s$ et une oscillation de vitesse de même fréquence qui dépendra de l'inertie. Cette oscillation de vitesse va engendrée deux courants de même amplitude, de fréquences $f_s(1 - 2g)$ et $f_s(1 + 2g)$. Les courants de fréquences $f_s(1 - 2g)$ et $f_s(1 + 2g)$ vont respectivement se soustraire et s'additionner au courant statorique. D'autres harmoniques du courant statorique peuvent être créés par le même phénomène dû aux courants de fréquences $f_s(1 \pm 2g)$ [26, 27].

Donc l'influence des barres ou portions d'anneaux de courts-circuits cassées sur le spectre du courant statorique est l'apparition d'harmoniques de fréquences :

$$f_{bc,ann} = f_s(1 \pm 2ng)Hz \quad (2.1)$$

Avec :

f_s fréquence d'alimentation ;

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

g glissement.

Les harmoniques à gauche du fondamental sont dues aux cassures de barres ou portion

d'anneaux de courts-circuits quand à celle de droite, elles sont dues aux oscillations de vitesse générées par ces défaillances.

2.3.1.2 Défaillances des roulements

Du fait que les roulements supportent le rotor, n'importe quelle défaillance de ceux-ci produira des mouvements radiaux du rotor par rapport au stator. Cela engendrera une anomalie au niveau de la densité de flux d'entrefer qui affectera les courants statoriques. C'est ainsi que les défaillances des roulements peuvent être détectées par l'analyse du spectre du courant statorique.

Les fréquences caractéristiques des défauts de roulements sont données par l'équation suivante [28] :

$$f_{\text{roulement}} = f_s \pm f_c \quad (2.2)$$

Pour distinguer les différents défauts de roulements, on les classe suivant l'élément affecté (§1.2.2.1). A chaque type de défaut est associé une fréquence caractéristique f_c (Tab.2.2) qui est fonction de la géométrie du roulement (Fig.2.3) et de la fréquence mécanique du rotor f_r .

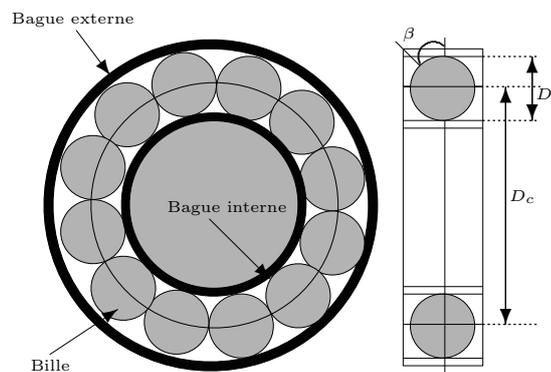


FIG. 2.3 – Géométrie des éléments d'un roulement à billes [29]

Pour le calcul exact des fréquences caractérisant les différents types de défauts données dans le tableau 2.2, il faut avoir des informations spécifiques à la construction du roulement. Dans le cas des roulements de six (6) à douze (12) billes, les fréquences des défauts de la bague extérieure f_i et intérieure f_o peuvent être calculées par l'approximation suivante [28] :

Défauts de la cage	$f_c = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b \cos \theta}{D_c} \right)$
Défauts de la bague extérieure	$f_o = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b \cos \theta}{D_c} \right)$
Défauts de la bague intérieur	$f_i = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 + \frac{D_b \cos \theta}{D_c} \right)$
Défauts de bille	$f_b = \frac{D_c}{D_b} f_r \left(1 - \frac{D_b^2 \cos^2 \theta}{D_c^2} \right)$

TAB. 2.2 – Fréquences caractéristiques des défaillances des roulements [28]

$$f_i = 0.6 \cdot N_b \cdot f_r \quad f_o = 0.4 \cdot N_b \cdot f_r \quad (2.3)$$

Avec N_b le nombre de billes.

2.3.1.3 Excentricité dynamique et statique

Une variation de l'entrefer d'une machine électrique à cause d'une excentricité dynamique, statique ou mixte (§1.2.3.3) provoque des variations de la densité de flux de l'entrefer. Ceci affecte le courant statorique qui permet de détecté par une analyse spectrale ces défaillances car elles font apparaître des harmoniques de fréquences données par l'équation suivante [11, 30] :

$$f_{exc} = f_s \left[(k \cdot R \pm n_d) \left(\frac{1-s}{p} \pm n_{\omega g} \right) \right] \quad (2.4)$$

Avec :

f_s fréquence d'alimentation ;

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

R nombre d'encoches rotorique ;

$n_d = 0, 1, 2, 3, \dots$ ordre d'excentricité :

$n_d = 0$ pour une excentricité statique ;

$n_d = 1, 2, 3, \dots$ pour une excentricité dynamique.

g glissement de la machine ;

p nombre de paires de pôle ;

$n_{\omega s} = 1, 3, 5, \dots$ ordre des harmoniques du courant statorique.

L'utilisation de cette expression nécessite une connaissance précise de la conception de la machine asynchrone. Une autre relation ne faisant pas apparaître de termes liés à

la conception de la machine, donne les fréquences induites proches du fondamental :

$$f_{exc} = f_s \left[1 \pm n \left(\frac{1-g}{p} \right) \right] \quad (2.5)$$

Avec :

f_s fréquence d'alimentation ;

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

g glissement de la machine ;

p nombre de paires de pôle.

L'ampleur du défaut d'excentricité dynamique est souvent exprimée en pourcentage comme suit :

$$\%excentricite\ dynamique = \frac{entrefer\ normal - min\ de\ l'entrefer}{entrefer\ normal} \quad (2.6)$$

2.3.1.4 Effets de la charge

Des oscillations du couple de charge font apparaître dans le spectre du courant statorique des harmoniques qui correspondent en partie ou toute à ceux issus des défauts électriques et mécaniques précédemment cités. Dans une machine idéale où le flux statorique est parfaitement sinusoïdal, n'importe quelle oscillation dans le couple de charge de fréquence $m f_r$ va engendrer des harmoniques dans les courants statoriques de fréquences [27] :

$$f_{charge} = f_s \pm m \cdot f_r = f_s \left[1 \pm n \left(\frac{1-g}{p} \right) \right] \quad (2.7)$$

Avec :

f_r fréquence de rotation du rotor ;

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

Il est bien évident que dans le cas du diagnostic basé sur le spectre du courant d'une phase, il faut bien s'assurer que les composantes dues aux défauts ne sont pas affectées par les oscillations du couple de charge.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les différentes méthodes utilisées pour le diagnostic des machines asynchrones à cage d'écureuil et détaillé la méthode d'analyse spectrale du courant statorique qui sera mise en application pour le diagnostic des défauts de cassures de barres et portions d'anneaux de courts-circuits, du désalignement et d'excentricité dynamique. Les fréquences caractérisant ces différents défauts ont été données et cela nous a permis de remarquer que la plupart des défauts mécaniques ont la même signature dans le spectre du courant statorique, cette remarque reste valable pour les défauts électriques. D'autre part, les oscillations du couple de charge peuvent induire en erreur le diagnostic.

Chapitre 3

Rappels sur le traitement du signal

Dans le but d'appliquer la méthode d'analyse spectrale du courant statorique pour le diagnostic de différents défauts de la machine asynchrone nous présentons dans ce chapitre les outils de traitement du signal.

On distingue deux types de signaux selon leurs origine qui peut être mécanique (Couple, vitesse, vibrations) où bien électrique (Tensions, courants). Ces signaux sont généralement périodiques et la méthode d'analyse de base est l'estimation de la densité spectrale de puissance basée sur la transformée de Fourier.

Ce travail porte sur le traitement de signaux stationnaires ou quasi-stationnaire (la fréquence des signaux ne varie pas ou varie lentement en fonction du temps), donc les méthodes d'analyse spectrale sont applicable.

3.1 Types de signaux

La connaissance du type du signal et ces propriétés sont d'une grande importance pour le choix d'une méthode d'analyse appropriée. Différents types de signaux peuvent être rencontrés et sont généralement classés selon l'organigramme présenté sur la Figure [3.1](#) [31].

3.1.1 Signaux déterministes

Les signaux déterministes sont des signaux qui peuvent être représentés par une expression mathématique. Ils peuvent généralement être classés selon que leur énergie soit

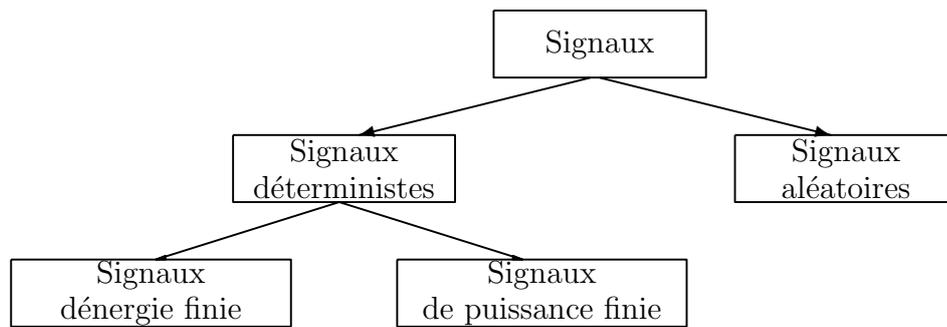


FIG. 3.1 – Types de signaux

finie ou bien que leur puissance le soit. Les signaux dits à énergie finie remplissent la condition suivante :

- Dans le cas d'un signal continu :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt < \infty \quad (3.1)$$

- Dans le cas d'un signal discret :

$$E = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} |x(k)|^2 < \infty \quad (3.2)$$

Les signaux à énergie finie ont généralement un caractère transitoire ou impulsif et vérifient souvent $|x(t)| \rightarrow 0$ pour $|t| \rightarrow \infty$

Dans le cas des signaux à puissance finie, la condition à remplir est :

- Dans le cas d'un signal continu :

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} |x(t)|^2 dt < \infty \quad (3.3)$$

- Dans le cas d'un signal discret :

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^N |x(k)|^2 < \infty \quad (3.4)$$

On pourrait citer comme exemple les signaux périodiques tels que les signaux sinusoïdaux.

3.1.2 Signaux aléatoires

Contrairement aux signaux déterministes, il est impossible de donner une description précise de l'évolution des signaux aléatoires ou stochastiques. Pour les décrire, il faut faire appel à la théorie des probabilités. Le signal numérique est alors défini comme une suite de variables aléatoires.

3.2 Transformée de Fourier

La transformée de Fourier d'un signal continu $x(t)$ est :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.5)$$

Où f désigne la fréquence en Hertz.

Pour les signaux d'énergie finie on a la formule de Parseval qui s'écrit :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |X(f)|^2 df \quad (3.6)$$

La fonction $|X(f)|^2$ est appelée spectre ou densité spectrale d'énergie. D'après la formule de Parseval, elle s'interprète en effet comme la répartition de l'énergie le long de l'axe des fréquences. [31]

3.3 Théorème d'échantillonnage

Pour la reconstruction d'un signal continu à partir d'échantillons, le théorème d'échantillonnage énonce qu'un signal réel à fréquence maximale f_s doit être échantillonné à une fréquence f_e supérieure à deux fois la fréquence f_s .

La fréquence minimale $2f_s$ permettant une reconstruction parfaite porte le nom de fréquence de Nyquist. Lorsque $f_e < 2f_s$, l'opération de reconstruction parfaite n'est plus possible. Les « motifs » interfèrent de façon irréversible : on dit qu'il y a repliement de spectre [32, 31].

3.4 Transformée de Fourier discrète

La transformée de Fourier à temps discret joue pour les signaux numériques le rôle de la transformée de Fourier pour les signaux à temps continu. Trouver une représentation fréquentielle consiste à rechercher des périodicités dans un signal et à en mesurer les contributions. La transformée de Fourier discrète (TFD) est l'outil de calcul de la TFD [32].

La TFD de la suite finie $x(0), \dots, x(N-1)$ est la suite finie :

$$X(m) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)e^{-j2\pi mk/N} \quad m = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.7)$$

Où $\frac{m}{N}$ est la fréquence normalisée discrète par rapport à la fréquence d'échantillonnage f_e . La fréquence f est obtenue par :

$$f = \frac{m}{N}f_e \quad (3.8)$$

La transformée de Fourier inverse (ITFD) est :

$$x(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X(m)e^{j2\pi mk/N} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.9)$$

Si le signal échantillonné est de longueur $N = 2^n$, la transformée de Fourier discrète peut être calculé à l'aide de l'algorithme de calcul nommé la transformée de Fourier rapide (FFT) qui permet un gain de temps de calcul :

$$Gain = \frac{N}{\log_2(N)} \quad (3.10)$$

3.5 Estimation spectrale

Les spectres de puissance indiquent la répartition en fréquences de la puissance du signal échantillonné de longueur finie. Il est utile de considérer séparément les signaux déterministes et aléatoires. Bien que similaires, les techniques utilisées pour chacun de ces deux types de signaux présentent des différences notables. [31]

3.5.1 Périodogramme

Le périodogramme est une méthode d'estimation de la densité spectrale de puissance d'un signal. La méthode directe de calcul du périodogramme utilise la transformée de Fourier rapide (FFT) du signal.

$$\hat{P}_{per}(f) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi f n} \right|^2 \quad (3.11)$$

Cette méthode permet de calculer rapidement la densité spectrale de puissance d'un signal échantillonné de durée finie, même s'il est périodique. Cet estimateur est biaisé et présente une variance non nulle.

3.5.2 Périodogramme moyenné

Pour améliorer les performances de l'estimateur précédent on calcule plusieurs périodogramme sur des signaux indépendants. La sinusoïde est la même pour les différents signaux mais le bruit est indépendant pour chaque réalisation. On calcule ensuite la moyenne des différents périodogrammes. Cette méthode réduit la variance d'un facteur égal au nombre de périodogrammes calculés.

$$\hat{P}_{moy,per}(f) = \frac{1}{K} \sum_{m=0}^{K-1} \hat{P}_{per,m}(f) \quad (3.12)$$

3.5.3 Utilisation des fenêtres

L'estimation du spectre est améliorée en pré-multipliant les données par une fonction de fenêtrage $w(n)$. Par ailleurs, la résolution fréquentielle est inversement proportionnelle à la longueur d'enregistrement et dépend également du type de fonction de fenêtrage.

$$\tilde{x}(n) = w(n)x(n) \quad (3.13)$$

Les effets du fenêtrage sont pris en compte dans l'estimation comme suit :

$$\hat{P}_{per}(f) = \frac{1}{NU} \left| \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{x}(n) e^{-j2\pi f n} \right|^2 \quad (3.14)$$

Où U est la correction du gain cohérente pour une fenêtre $w(n)$ avec :

$$U = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} w^2(n) \quad (3.15)$$

Les fenêtres les plus couramment utilisées sont : la fenêtre rectangulaire, triangulaire ou de Bartlett, Hamming, Hanning et Blackman.

3.5.4 Estimateurs spectraux à variance réduite

Du fait que le nombre d'échantillons N du signal n'a pas d'influence sur la variance du périodogramme, on a recourt aux périodogrammes à variance réduite tel que les périodogrammes de Bartlett ou encore de Welch.

La méthode de Welch consiste à calculer plusieurs périodogrammes à partir d'un unique signal en utilisant une fenêtre glissante de taille très inférieure à la taille du signal (Segmentation du signal). La différence entre les périodogrammes de Bartlett et de Welch réside dans le fait que la méthode de Welch, les segments peuvent se chevaucher dans un rapport allant de 50% à 75% [32, 31].

Chapitre 4

Résultats Expérimentaux

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté les différents défauts que peut présenter la machine asynchrone à cage d'écurueil et leurs influences. D'autre part, différentes méthodes de diagnostic ont été abordées, parmi lesquelles la méthode de l'analyse spectrale du courant statorique que nous avons détaillée en présentant les différents outils de traitement du signal et les fréquences caractérisant les défauts.

Dans le présent chapitre, nous appliquons la méthode de l'analyse spectrale du courant statorique pour le diagnostic de défauts de cassure de barres et de portion d'anneau de court-circuit, de désalignement et d'excentricité dynamique ainsi que pour l'étude de l'influence du niveau de charge et des oscillations du couple de charge sur le diagnostic. Pour l'application de cette méthode, nous utilisons le périodogramme de Welch avec la fenêtre de Hanning dont la longueur est de $\frac{N}{2}$ pour le diagnostic des défauts électriques et de $\frac{N}{8}$ dans le cas des défauts mécaniques (voir annexe A).

4.1 Description et présentation des bancs d'essais

4.1.1 Banc d'essais pour le diagnostic des défauts électriques

Pour l'étude des défauts de cassures de barres et de portion d'anneau de court-circuit, une acquisition d'une durée de 10 s à une fréquence de 10 kHz ($N = 100000$) des trois courants, des tensions de phases et de la vitesse a été effectuée sur le banc d'essai du laboratoire de recherche en électrotechnique de l'École Nationale Polytechnique d'Alger

qui est représenté sur le schéma de la figure 4.1.

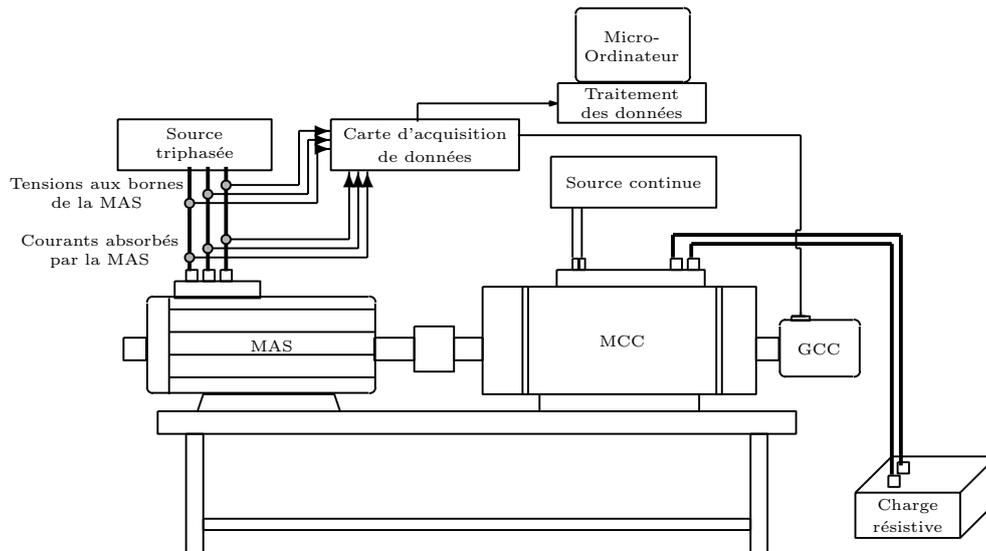


FIG. 4.1 – Banc d'essais ENP

Quatre Machines asynchrones à cage d'écureuil dont les principales caractéristiques sont données dans le tableau 4.1 ont été utilisées :

- machine saine prise comme référence pour le diagnostic ;
- machine avec une barre rotorique cassée ;
- machine avec deux barres rotoriques cassées adjacentes ;
- machine avec une portion d'anneau de court-circuit enlevée.

Puissance nominale	4 kW
Tension nominale	220/380 V
Courant nominal	15.3/8.83 A
Vitesse nominale	1435 tr/mn
Facteur de puissance	0.83
Nombre de paires de pôles	2
Nombre d'encoches statoriques	36
Nombre de barres rotoriques	28

TAB. 4.1 – Défaits électriques : Plaque signalétique de la machine asynchrone

Pour charger la machine, on utilise une machine à courant continu dont la plaque signalétique est donnée dans le tableau 4.2.

Puissance nominale	2.4 kW
Tension	220 V
Courant d'induit	10.9 A
Vitesse nominale	1410 tr/mn
Courant d'excitation	3 A

TAB. 4.2 – Défauts électriques : Plaque signalétique de la machine à courant continu

Vu que la puissance nominale de la machine à courant continu n'est que de 2.4 kW, la charge maximale de la machine asynchrone est d'environ 70% de sa charge nominale.

Une génératrice tachymétrique montée directement sur l'arbre de la machine à courant continu est utilisée pour la mesure de la vitesse.

Pour l'acquisition des signaux, le laboratoire dispose d'une carte pour le conditionnement des signaux reliée à une carte d'acquisition IOTEQ/DAQ séries 1005, ayant une fréquence d'échantillonnage de 200 kHz, 16 entrées analogiques, 16 entrées digitales ; toutes les entrées peuvent être utilisées comme des sorties.

4.1.2 Banc d'essais pour le diagnostic des défauts mécaniques

Pour l'étude des défauts mécaniques, on traite des relevés d'essais effectués par l'équipe de recherche du Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie de Toulouse (LAPLACE) sur le banc représenté sur la figure 4.2.

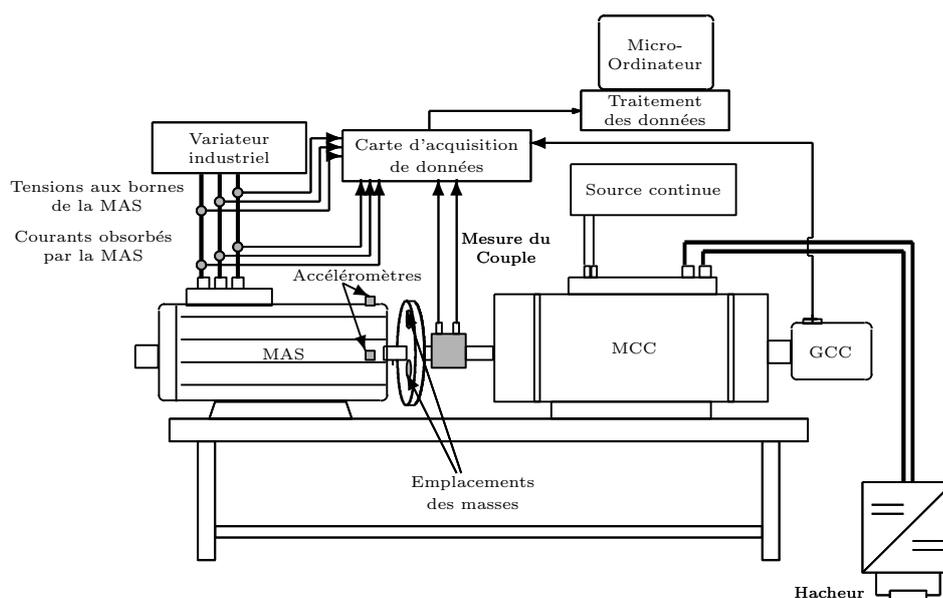


FIG. 4.2 – Banc d'essais du laboratoire LAPLACE, ENSEEIHT

Ce dernier se compose d'une machine asynchrone couplée à une machine à courant

continu utilisée en génératrice débitant sur une résistance à travers un hacheur. Les plaques signalétiques des deux machines sont données dans les tableaux 4.3 et 4.4.

Les trois courants statoriques, les trois tensions, le couple instantané, la vitesse et les vibrations ont été relevés à une fréquence de 25.6 kHz pendant une durée de 19.84 s ($N = 507904$) via une carte d'acquisition de 24 bits pour les différents défauts présentés ci-dessous :

- oscillations du couple de charge, générées par le contrôle du courant débité par la machine à courant continu à l'aide du hacheur ;
- désalignements angulaire (1.5 mm et 2.4 mm) et parallèle (2.0 mm, 2.4 mm et 3.8 mm) ;
- excentricité dynamique d'environ 40%.

Puissance nominale	5.5 kW
Couplage	Y
Tension	400 V
Courant nominal	10.5 A
Vitesse nominale	1445 tr/mn
Nombre de paires de pôles	2
Nombre d'encoches statoriques	48
Nombre de barres rotoriques	28
Couple nominal	35 N.m
Rendement	87%

TAB. 4.3 – Défauts mécaniques : Plaque signalétique de la machine asynchrone

Tension d'induit	260 V
Vitesse nominale	1450 tr/mn
Tension d'excitation	190 V
Courant d'excitation	1 A
Courant admissible	17.6 A

TAB. 4.4 – Défauts mécaniques : Plaque signalétique de la machine à courant continu

4.2 Cassures de barres et de portion d'anneau de court-circuit

Dans cette section nous étudions l'effet des cassures de barres et de portion d'anneau de court-circuit sur le spectre du courant statorique. Pour cela, nous analysons la densité spectrale de puissance.

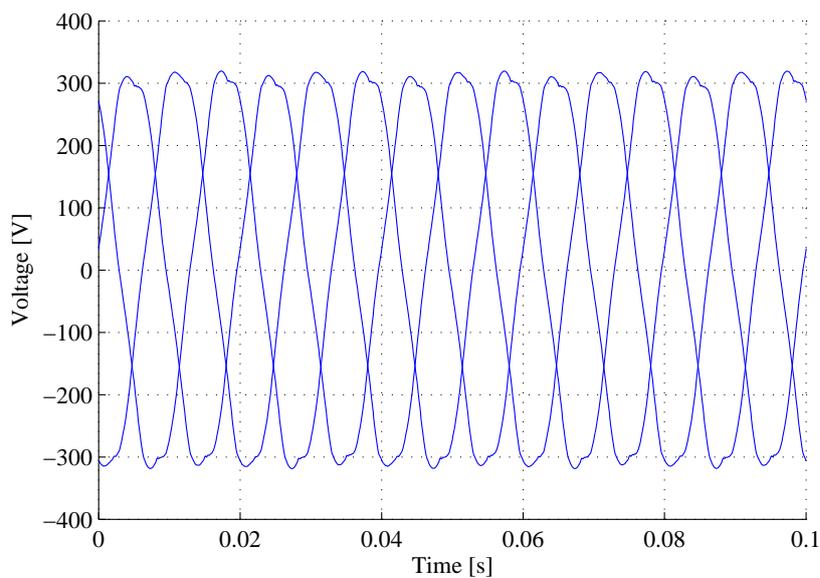


FIG. 4.3 – Tensions d'alimentation

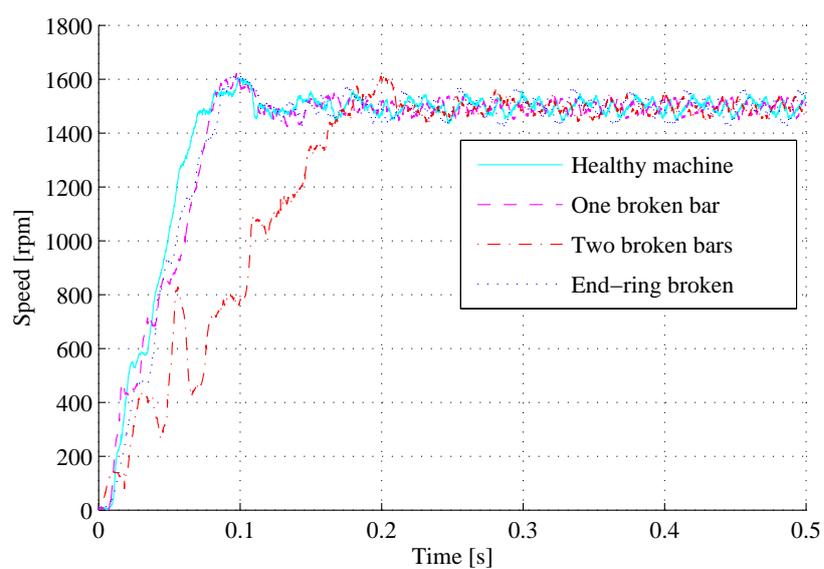


FIG. 4.4 – Vitesses des différents moteurs à 70% de charge

Les cassures de barres et portion d'anneau de court-circuit ont pour effet l'augmentation du régime transitoire de la vitesse (Figure 4.4). Cette augmentation croît avec la sévérité du défaut ; dans le cas d'une barre cassée la constante de temps mécanique est de $0.053s$ et pour deux barres cassées, elle est de $0.11s$ alors que pour la machine saine, elle est de $0.047s$. La constante de temps dans le cas d'une portion d'anneau de court-circuit est de $0.054s$ qui est quasiment identique à celle d'une barre cassée.

D'autre part, ces défauts engendrent des ondulations du courant statorique comme on peut le voir sur la figure 4.5, où on constate que l'ondulation du courant de la machine avec deux barres cassées est plus importante que celle d'une barre ou portion d'anneau de court-circuit cassée qui sont quasiment identiques.

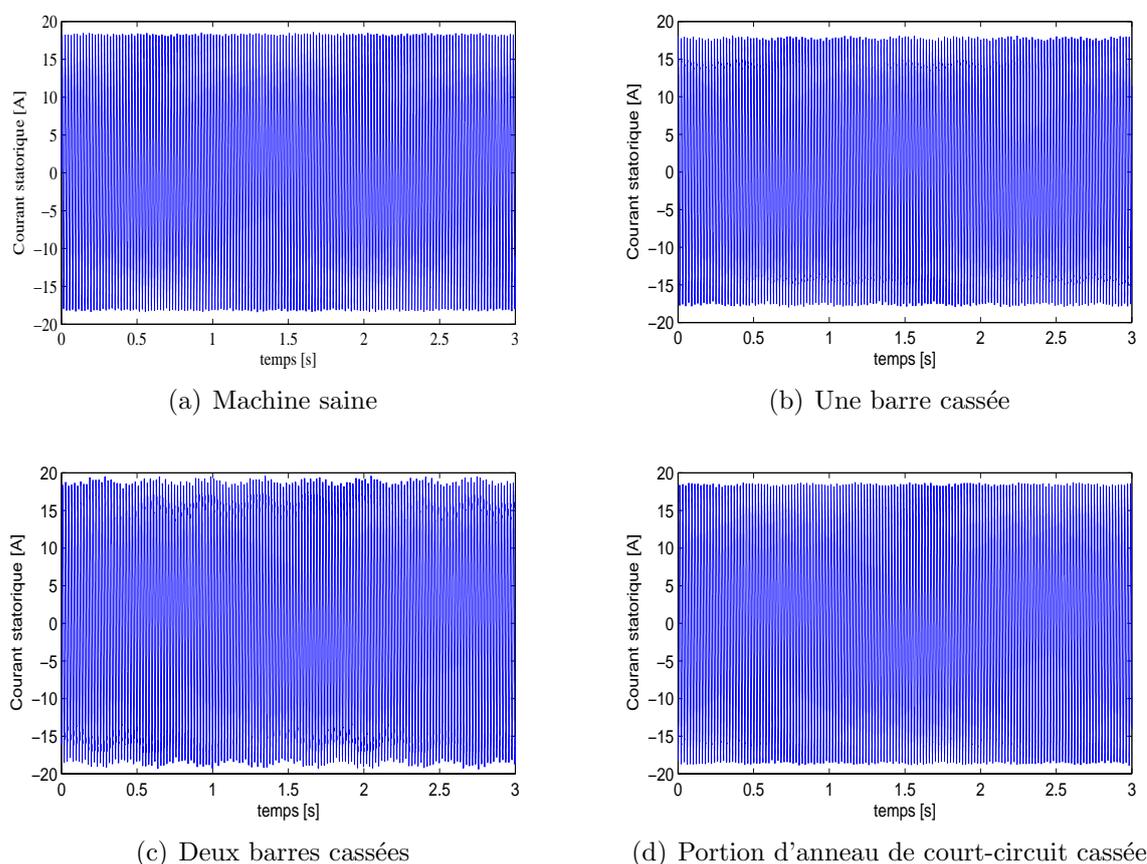
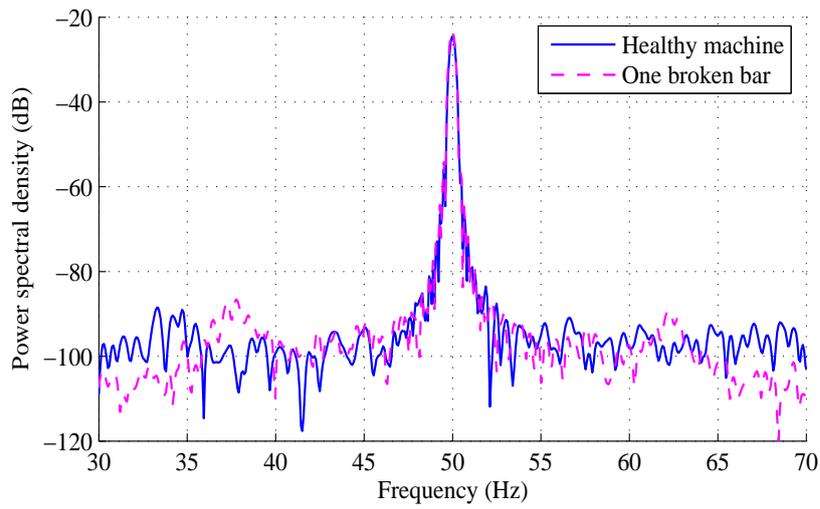
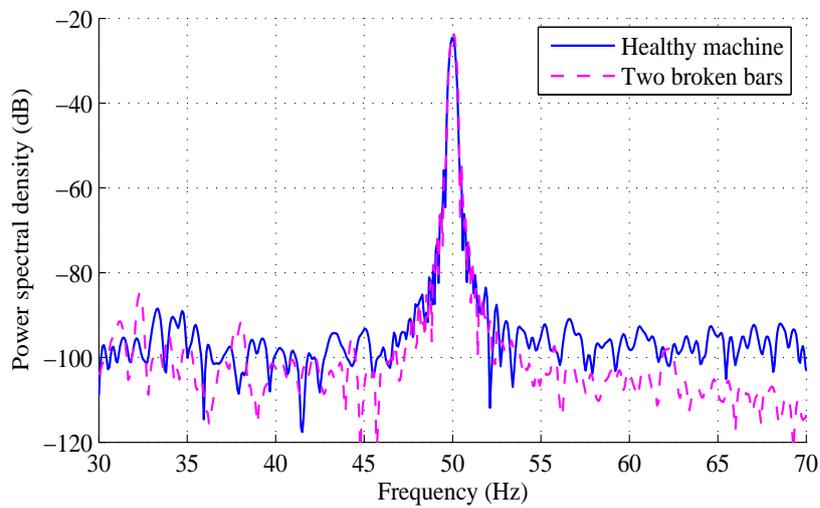


FIG. 4.5 – Courant statorique des différentes machines à 70% de charge.

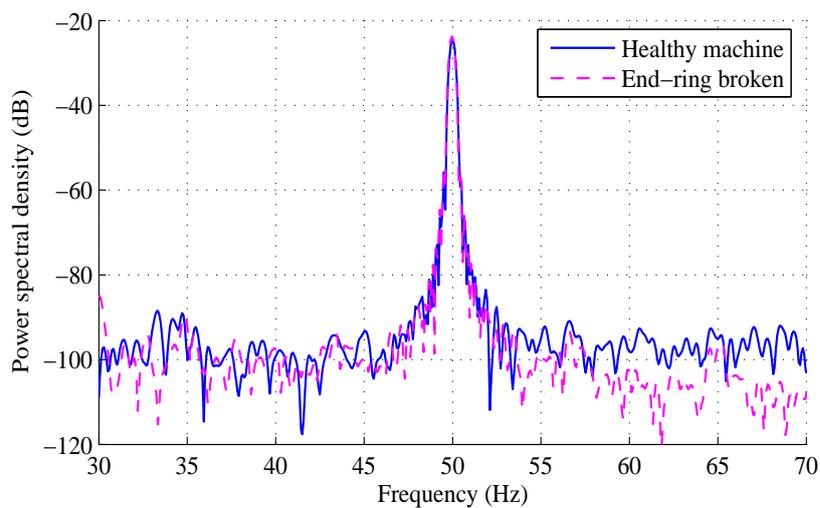
Comme on constate des figures 4.6(a), 4.6(b) et 4.6(c) représentant la densité spectrale de puissance du courant statorique des différentes machines à vide, que le diagnostic est difficile du fait du rapprochement des harmoniques de fréquences $f_s(1 \pm 2kg)$ caractérisant les défauts du fondamental et cela est dû au faible glissement.



(a) Une barre cassée



(b) Deux barres cassées



(c) Portion d'anneau de court-circuit cassée

FIG. 4.6 – Analyse spectrale du courant statorique à vide

Cependant, l'analyse spectrale des courants statoriques relevés lors d'essais effectués à 70% de charge (Figures 4.7(a), 4.7(b) et 4.7(c)) nous permet de constater l'augmentation des amplitudes d'harmoniques de fréquences $f_s(1 \pm 2kg)$ caractérisant les défauts de cassure de barres et de portion d'anneau de court-circuit.

L'augmentation des amplitudes et la dissymétrie entre les harmoniques de gauche et de droite du fondamental constatées sur le spectre du courant statorique sont respectivement dues à une modulation d'amplitude et à une modulation de fréquence du courant statorique.

Le tableau 4.5 donne l'amplitude des harmoniques $f_s(1 \pm 2kg)$ des différentes machines, duquel on tire le graphe de la figure 4.8 qui nous permet d'observer l'évolution de ces amplitudes selon la sévérité du défaut.

Harmoniques	-4	-3	-2	-1	1	2	3	4
Machine Saine	-92,68	-92,61	-94,95	-70,41	-71,07	-86,57	-88,10	-92,95
1 barre cassée	-87,59	-80,89	-80,035	-63,56	-63,90	-76,46	-79,16	-84,30
2 barre cassées	-75,50	-70,35	-81,74	-54,98	-54,43	-85,74	-67,65	-71,10
Portion d'anneau	-86,77	-89,78	-85,53	-65,53	-62,05	-88,69	-82,98	-87,09

TAB. 4.5 – Amplitudes des harmoniques en dB

Pour le diagnostic des défauts électriques du rotor, on s'intéresse principalement aux harmoniques à gauche du fondamental qui caractérisent ces défauts. On remarque que leurs amplitudes augmentent avec la sévérité du défaut (Figure 4.8) et que le cas de deux barres est plus sévère que celui d'une barre ou d'une portion d'anneau de court-circuit cassées. Quant aux harmoniques à droite du fondamental, elles nous donnent de plus amples informations sur la sévérité du défaut.

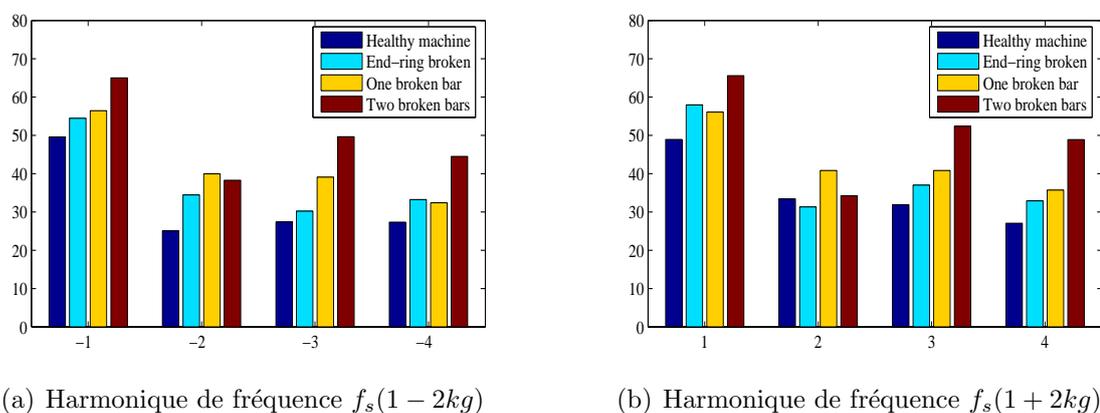
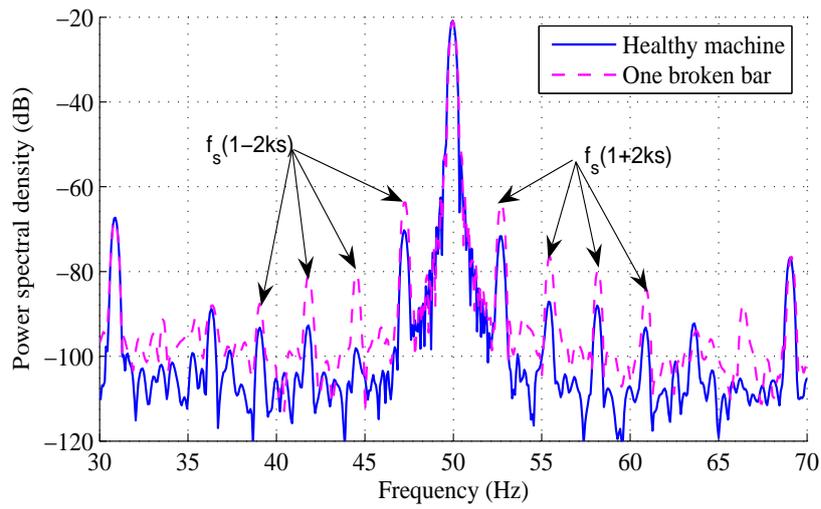
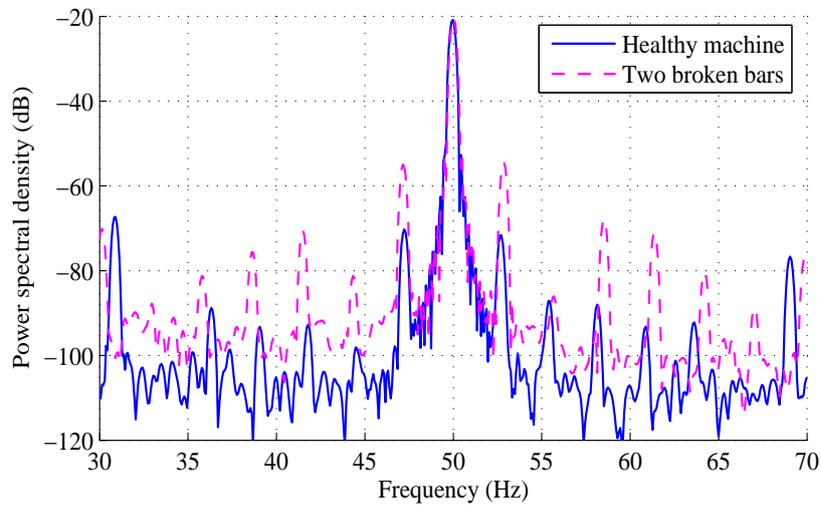


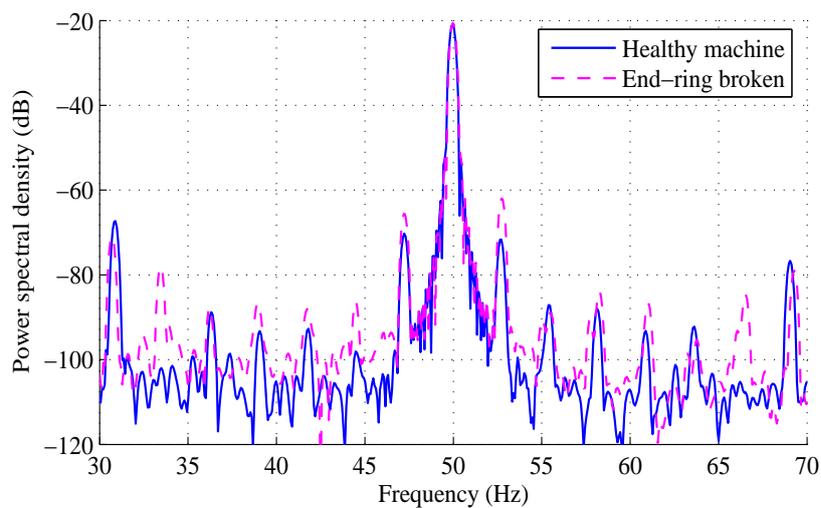
FIG. 4.8 – Variations des amplitudes des harmoniques pour les défauts électriques



(a) Une barre cassée



(b) Deux barres cassées



(c) Portion d'anneau de court-circuit cassée

FIG. 4.7 – Défaits électriques : Analyse spectrale du courant statorique à 70% de charge

4.3 Oscillation du couple de charge

Les différents défauts électriques et mécaniques engendrent des oscillations de couple et de vitesse. Pour étudier leurs influence sur le spectre du courant statorique et par conséquent sur le diagnostic des différents défauts, on génère des oscillations du couple de charge d'amplitude allant de 0.03 à 0.18 N.m et ce, en faisant varier le courant débité par la machine à courant continu avec un hacheur. Les différentes amplitudes d'oscillation du couple pour différents niveaux de charge sont estimées (voir annexe B.1) et données dans le tableau 4.6.

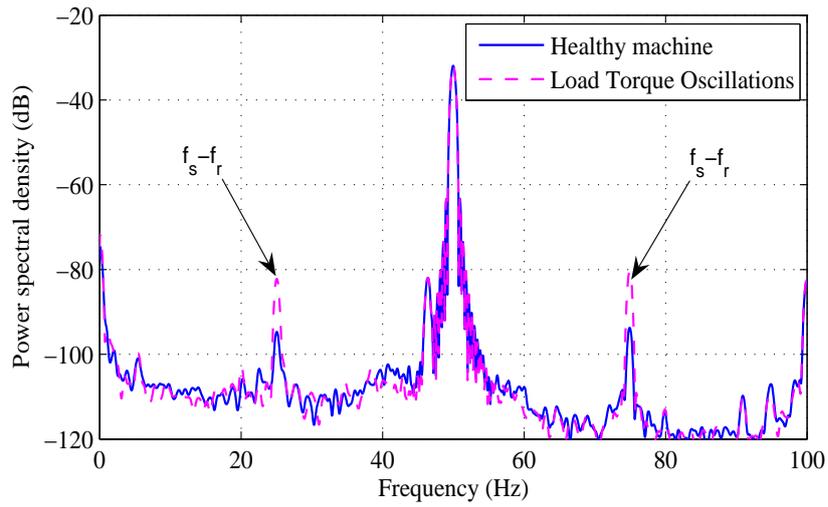
Charge	10%	50%	80%
Machine Saine	0,020	0,021	0,021
LTO1 (0.03 N.m)	0,031	0,035	0,032
LTO2 (0.07 N.m)	0,065	0,070	0,056
LTO3 (0.11 N.m)	0,100	0,110	0,117
LTO4 (0.14 N.m)	0,134	0,153	0,148
LTO5 (0.18 N.m)	0,179	0,188	0,207

TAB. 4.6 – Amplitudes des oscillations du couple de charge en N.m

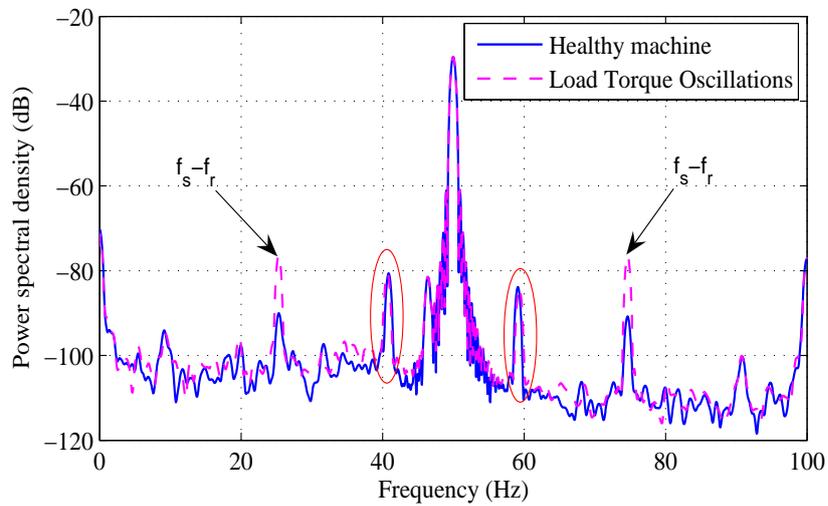
Des figures 4.8(a), 4.8(b) et 4.8(c) représentant la densité spectrale de puissance du courant statorique pour la machine saine et avec oscillation du couple de charge pour différents niveaux de charge, on remarque l'augmentation de l'amplitude des harmoniques de fréquence $f_s \pm f_r$ avec l'augmentation du niveau des oscillations du couple de charge où f_r est la fréquence de rotation du rotor.

D'autre part, on constate l'apparition d'harmoniques de fréquence dépendant du glissement (entourés sur les graphes avec des ellipses) pour 50% et 80% de la charge nominale (Figures 4.8(c) et 4.8(b)). La cause exacte en est inconnue, mais elle pourrait avoir une relation avec la construction de la machine.

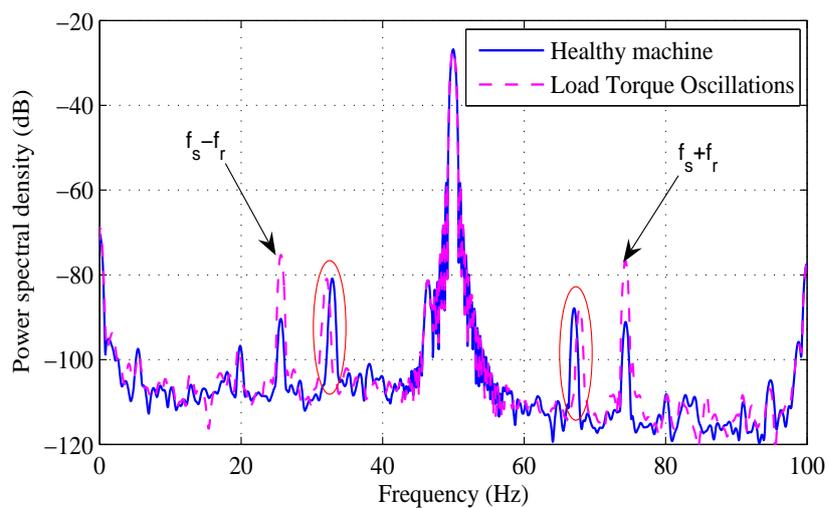
Le tableau 4.7 donne les amplitudes des harmoniques correspondant aux fréquences $f_s \pm f_r$ en dB pour différents niveaux de charge et d'oscillation du couple. De la figure 4.9 obtenue en estimant l'amplitude des harmoniques par rapport à un seuil (-120 dB), on remarque l'augmentation de l'amplitude de ces harmoniques sous l'influence de l'augmentation des oscillations du couple de charge. D'autre part, on constate que les écarts entre les amplitudes des harmoniques des différents niveaux de défaillance et de la machine saine sont quasiment identiques pour les trois niveaux de charge.



(a) 10% de charge



(b) 50% de charge



(c) 50% de charge

FIG. 4.8 – Oscillation du couple de charge : Analyse spectrale du courant statorique (LTO5)

Fréquence	$f_s - f_r$			$f_s + f_r$		
	80%	50%	10%	80%	50%	10%
M.S	-90,38	-90,03	-94,70	-91,12	-90,79	-93,74
LTO1	-84,62	-85,05	-89,76	-86,42	-86,12	-89,65
LTO2	-81,16	-82,09	-87,23	-82,69	-82,86	-86,18
LTO3	-78,34	-79,36	-85,21	80,24	-80,24	-83,58
LTO4	-76,75	-77,52	-83,19	-78,23	-78,35	-82,03
LTO5	-75,28	-76,37	82,22	-76,72	-76,55	-80,67

TAB. 4.7 – Oscillation du couple de charge : Amplitudes des harmoniques de courant en dB

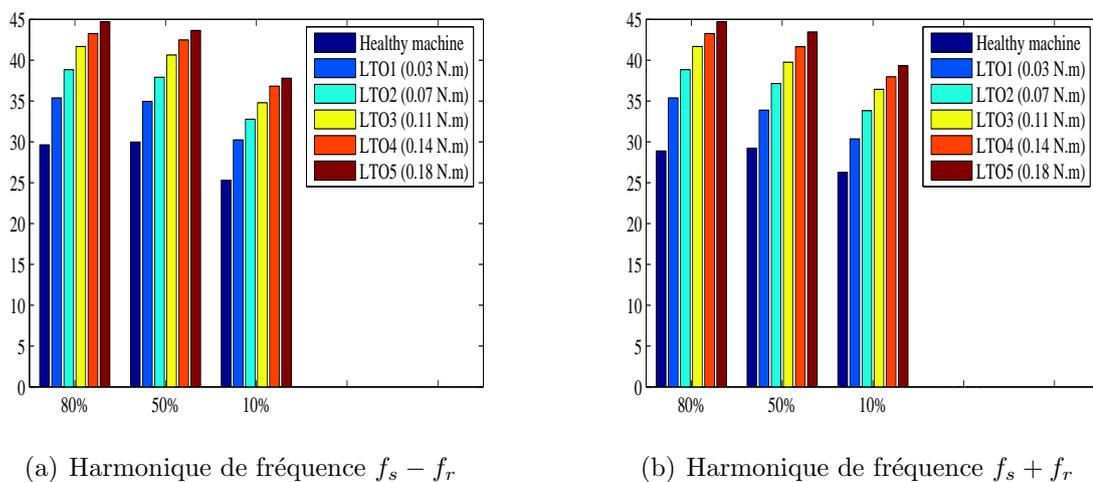


FIG. 4.9 – Variations des harmoniques de courant pour différents niveaux d'oscillation et de charge

4.4 Désalignement

Un mauvais couplage ou une défaillance d'ordre mécanique tel qu'une défaillance des roulements ou un mauvais assemblage de la machine peut entraîner un désalignement qui engendre en général de fortes vibrations axiales. Dans ce qui suit, nous présentons les résultats obtenus lors d'essais effectués sur une machine sur laquelle des défauts de couplage ont été intentionnellement créés afin d'obtenir les désalignements angulaire et parallèle.

Les figures 4.10 et 4.11 illustrent la densité spectrale de puissance du courant statorique pour un désalignement angulaire et parallèle respectivement. On remarque la variation des amplitudes des harmoniques de fréquence $f_s \pm f_r$ caractérisant ces types de défauts.

Du tableau 4.8 représentant les amplitudes des oscillations du couple, on constate qu'un désalignement n'entraîne pas nécessairement une augmentation des oscillations du couple (da_1 et da_3). D'autre part, l'accentuation du désalignement entraîne l'augmentation des amplitudes des oscillations du couple et l'augmentation du niveau de charge a pour effet de les diminuer.

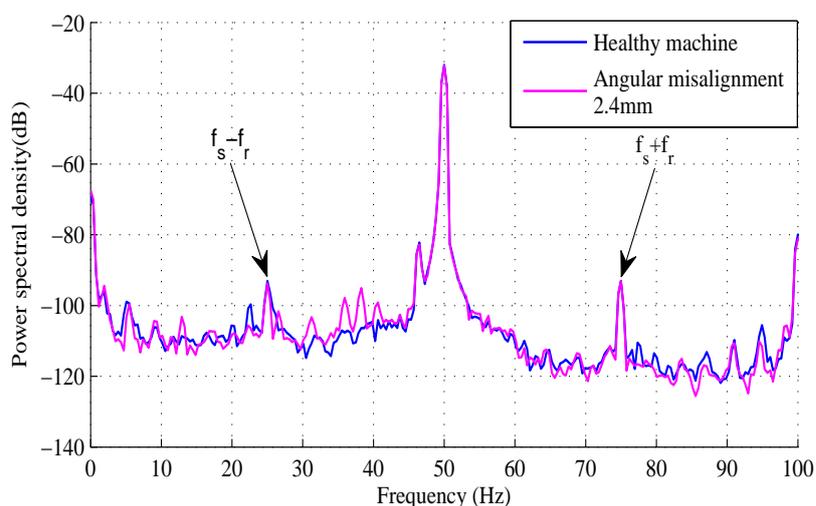


FIG. 4.10 – Analyse spectrale du courant statorique pour un désalignement angulaire de 2.4 mm à 80% de charge

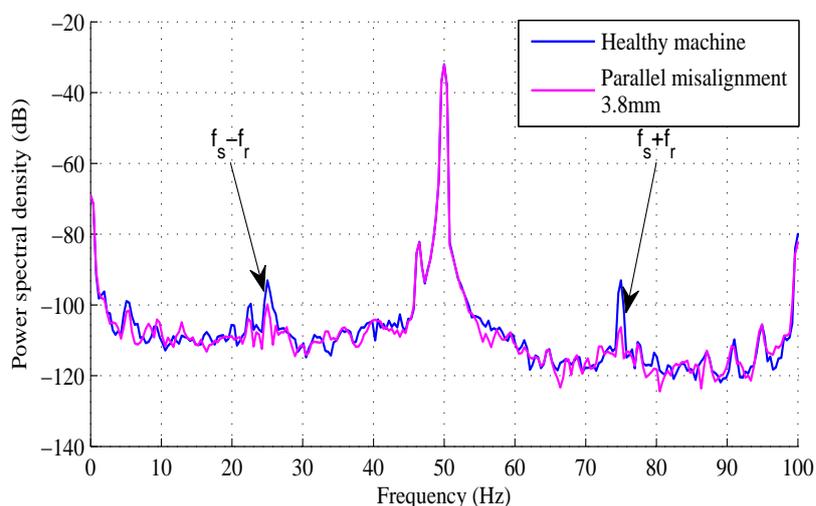


FIG. 4.11 – Analyse spectrale du courant statorique pour un désalignement parallèle de 3.8 mm à 80% de charge

Charge	10%	50%	80%
Machine Saine	0,020	0,021	0,021
Désalignement angulaire de 1.5 mm (da1)	0.025	0.014	0.011
Désalignement angulaire de 2.4 mm (da2)	0.048	0.025	0.023
Désalignement parallèle de 2.0 mm (da3)	0.018	0.019	0.010
Désalignement parallèle de 2.4 mm (da4)	0.039	0.028	0.030
Désalignement parallèle de 3.8 mm (da5)	0.054	0.049	0.049

TAB. 4.8 – Désalignement : Amplitudes des oscillations du couple en N.m

L'analyse des graphiques de la figure 4.12, représentant les amplitudes des harmoniques de courant de fréquences $f_s \pm f_r$, permet de constater que dans le cas d'un désalignement angulaire, plus le niveau du désalignement augmente plus les amplitudes des harmoniques de courant augmentent, alors que dans le cas d'un désalignement parallèle, elles diminuent.

Fréquence	$f_s - f_r$			$f_s + f_r$		
	80%	50%	10%	80%	50%	10%
M.S	-90,38	-90,029	-94,70	-91,12	-90,79	-93,74
da1	-90,374	-91,027	-98,759	-91,256	-90,415	-92,492
da2	-88,396	-91,038	-92,925	-90,873	-90,502	-92,925
da3	-90,959	-90,337	-93,941	-92,16	-92,4	-93,651
da4	-94,185	-94,685	-96,251	-95,144	-94,616	-97,513
da5	-102,53	-101,66	-98,321	-105	-104,87	-104,72

TAB. 4.9 – Désalignement : Amplitudes des harmoniques de courant en dB

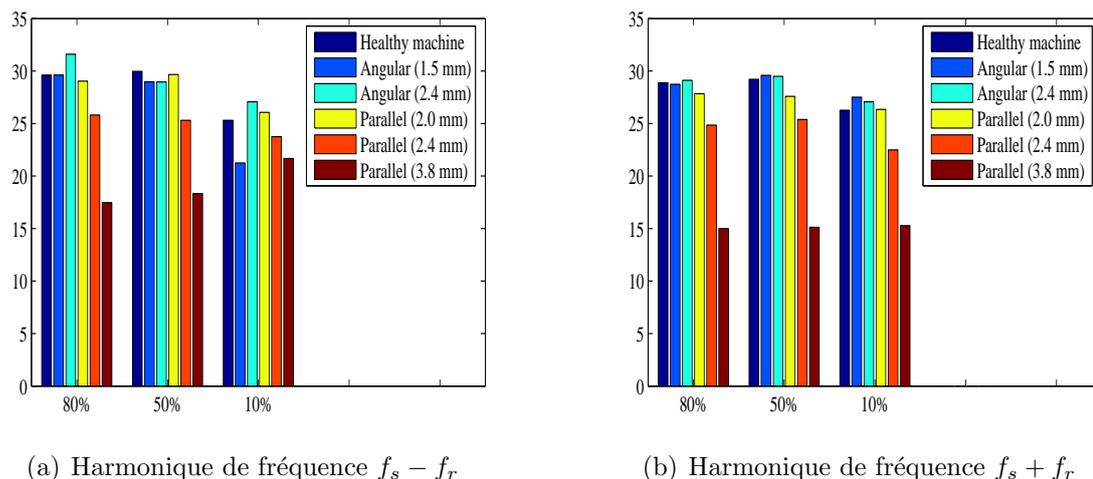


FIG. 4.12 – Variations des amplitudes des harmoniques de courant pour différents niveaux et types de désalignement

Ainsi, dans le cas d'un désalignement angulaire, l'augmentation des oscillations du couple coïncide avec l'augmentation des amplitudes des harmoniques de courant. C'est

ce qui a été observé lors de l'étude de l'influence des oscillations du couple de charge sur le spectre du courant. Quant au cas d'un désalignement parallèle, bien que les oscillations du couple augmentent, les amplitudes des harmoniques de courant diminuent.

Charge	10%	50%	80%
da1	1.24	2.50	3.93
da2	0.56	0.66	1.00
da3	0.28	0.79	0.34
da4	1.55	1.98	3.06
da5	1.38	2.36	4.55

TAB. 4.10 – Variation du couple moyen (%) sous l'effet du désalignement

Du tableau 4.10 donnant les variations du couple moyen pour chaque type de désalignement, on constate que l'augmentation du désalignement angulaire entraîne la diminution du couple moyen malgré que les amplitudes des oscillations augmentent. Alors que dans le cas du désalignement parallèle, le couple moyen augmente avec l'accentuation du désalignement qui engendre une augmentation des amplitudes des oscillations du couple.

4.5 Excentricité dynamique

Pour l'étude de l'influence de l'excentricité dynamique sur le spectre du courant statorique, des essais ont été effectués sur une machine ayant une excentricité dynamique d'environ 40%. Les figures 4.14(a), 4.14(b) et 4.14(c) représentent la densité spectrale de puissance du courant statorique de la machine pour les niveaux de charge de 10%, 50% et 80%.

L'excentricité dynamique a pour effet sur le spectre du courant statorique l'augmentation des harmoniques correspondant aux fréquences $f_{exc} = f_s \pm m \cdot f_r$, comme on l'observe sur les figures 4.14(a), 4.14(b) et 4.14(c). D'autre part, on constate une diminution du bruit avec l'augmentation de la charge.

Fréquence	$f_s - f_r$			$f_s + f_r$		
	80%	50%	10%	80%	50%	10%
Machine saine	-90,38	-90,029	-94,70	-91,12	-90,79	-93,74
Désalignement	-79,903	-85,076	-92,492	-82,882	-85,652	-81,022

TAB. 4.11 – Excentricité dynamique : Amplitudes des harmoniques de courant en dB

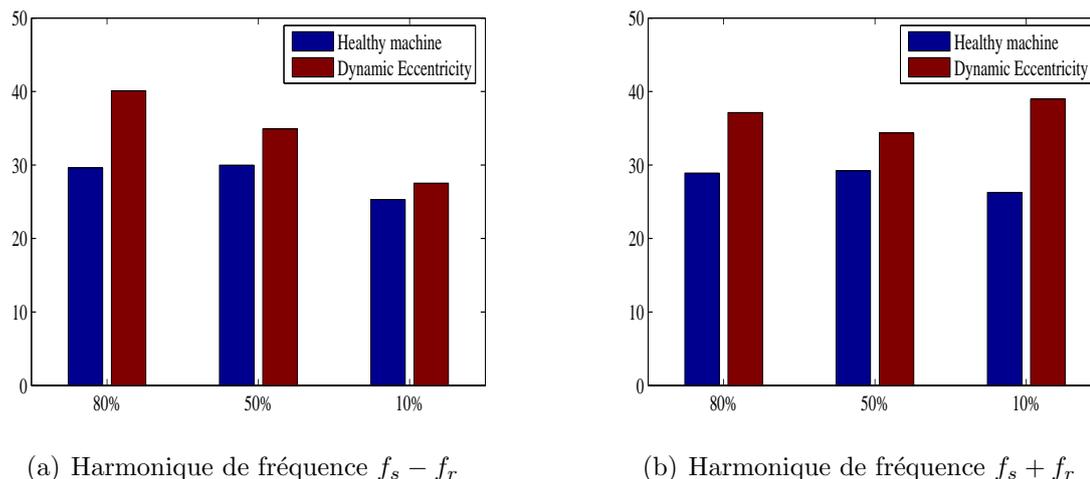


FIG. 4.13 – Excentricité dynamique : Variations des amplitudes des harmoniques de courant pour différents niveaux de charge

De la figure 4.13, on constate l'augmentation des amplitudes des harmoniques de fréquence $f_s - f_r$ avec l'augmentation de la charge, ce qui n'est pas le cas pour les harmoniques de fréquence $f_s + f_r$. Cette asymétrie peut être due à une modulation de phase introduite par le défaut.

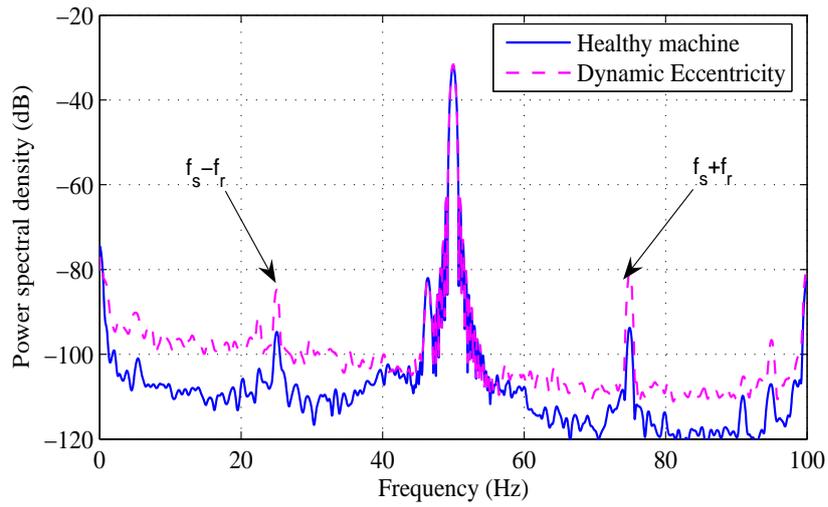
De l'analyse du couple, on constate que l'excentricité dynamique a pour effets l'augmentation de l'amplitude des oscillations du couple (Tableau 4.12) et l'augmentation de la valeur moyenne du couple (tableau.4.13).

Charge	10%	50%	80%
Machine Saine	0,020	0,021	0,021
Excentricité dynamique	0.052	0.061	0.083

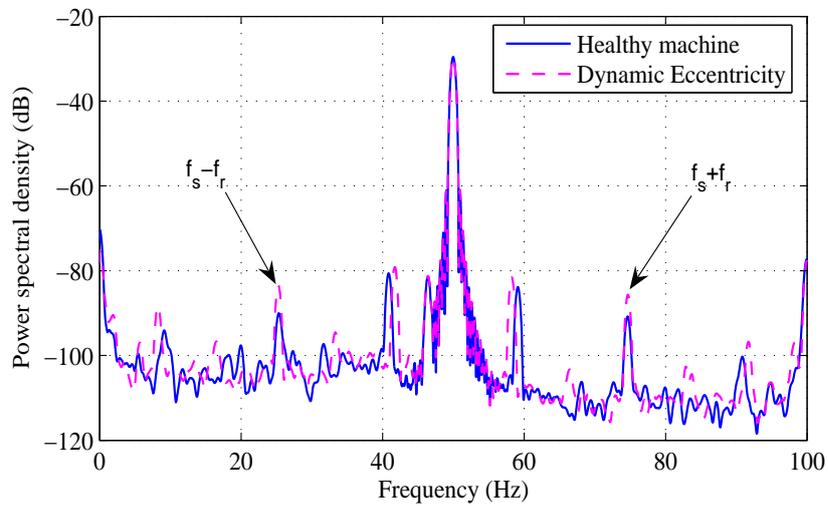
TAB. 4.12 – Excentricité dynamique : Amplitudes des oscillations du couple en N.m

Charge	10%	50%	80%
Variation (%)	1.23	0.48	1.77

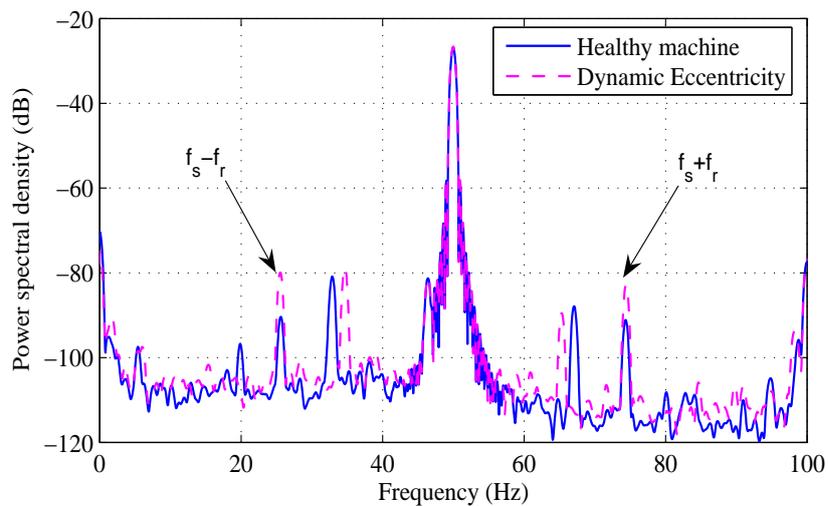
TAB. 4.13 – Effet de l'excentricité dynamique sur le couple moyen



(a) 10% de charge



(b) 50% de charge



(c) 80% de charge

FIG. 4.14 – Excentricité dynamique : Analyse spectrale du courant statorique

4.6 Conclusion

La méthode de l'analyse spectrale du courant statorique a permis de diagnostiquer les défauts de cassures de barres et de portion d'anneau de court-circuit, de désalignements et de l'excentricité dynamique ainsi que d'évaluer leurs sévérités. En plus d'être simple à mettre en œuvre, cette méthode présente l'avantage de distinguer entre les défauts électriques et mécaniques du fait que les fréquences les caractérisant soient différentes. Mais elle nécessite d'effectuer les essais en charge et ne permet pas de différencier entre les défauts d'excentricité dynamique et de désalignement du fait que leurs fréquences soient similaires. D'autre part, la variation du niveau de charge, la présence d'oscillation du couple de charge ou de balourds peuvent entraîner des erreurs de diagnostic.

Les essais réalisés pour l'étude de l'influence des oscillations du couple de charge ont permis d'observer que pour différents niveaux de charge, les variations des amplitudes des harmoniques dues aux oscillations du couple restent quasiment constantes et cela peut être utilisé pour distinguer entre l'excentricité dynamique et les oscillations du couple de charge.

Conclusion générale

Le diagnostic et la surveillance des systèmes électriques sont de plus en plus utilisés dans la plupart des domaines industriels, d'où l'intérêt grandissant porté à ce sujet. La machine asynchrone étant l'élément le plus utilisé et l'un des plus importants dans les systèmes électriques, sa surveillance et son diagnostic ont fait et font toujours l'objet de plusieurs études [11]–[30].

Dans notre travail, nous avons effectué une étude expérimentale pour le diagnostic de défauts électriques et mécaniques de la machine asynchrone à rotor à cage d'écureuil. Notre choix s'est porté sur la méthode de l'analyse spectrale du courant statorique qui est la plus largement utilisée et cela est principalement dû à la facilité de la mesure du courant et aux informations que peut donner son spectre pour les différentes défaillances qu'elles soient électriques ou mécaniques. Cette étude a permis de vérifier pratiquement les fréquences des signatures qu'engendrent les défauts de cassures de barres, de portion d'anneau de court-circuit, de désalignement et d'excentricité dynamique sur le courant statorique et d'observer l'influence que peuvent avoir les oscillations du couple et le niveau de charge sur le diagnostic des défauts mécaniques.

Les défauts électriques étudiés ont pour fréquences caractéristiques $f_s(1 \pm 2g)$; ces fréquences dépendent du glissement donc du niveau de charge de la machine. Les essais effectués pour ce type de défauts ont permis de constater qu'avec les essais à vide, le diagnostic est difficile du fait du rapprochement des harmoniques caractérisant le défaut du fondamental, contrairement à ceux effectués en charge qui ont permis d'obtenir des spectres dans lesquels on distingue clairement les signatures des défauts. D'autre part, les amplitudes des harmoniques caractérisant les défauts dépendent de leurs sévérités, le cas de deux barres cassées est plus sévère que celui d'une barre ou d'une portion d'anneau de court-circuit; ces deux derniers cas sont quasiment identiques. Il a également été observé

que les caractéristiques de vitesse sont influencées par la sévérité du défaut : la constante de temps mécanique augmente avec la sévérité du défaut.

Quant aux défauts mécaniques, leurs fréquences caractéristiques $f_s(1 \pm f_r)$ dépendent de la fréquence de rotation de l'arbre f_r . Pour le diagnostic de ces types de défauts, des essais ont été effectués sur des machines présentant des défauts d'excentricité dynamique et de désalignement. Pour voir l'influence que peut avoir le niveau de charge et les oscillations du couple de charge, tous les essais ont été réalisés à trois niveaux de charge soit 10%, 50% et 80% de la charge nominale et cinq niveaux d'oscillations du couple de charge allant de 0.03 à 0.18 N.m ont été générés.

Le traitement des relevés expérimentaux nous a permis d'observer que les défauts mécaniques traités engendrent des oscillations de couple dont l'amplitude augmente avec l'accentuation de la défaillance. Quant aux harmoniques de courant caractérisant le défaut de désalignement, leurs amplitudes augmentent avec l'aggravation du défaut dans le cas d'un désalignement angulaire mais elles diminuent dans le cas d'un désalignement parallèle. En ce qui concerne l'excentricité dynamique (40%), elle entraîne l'augmentation des amplitudes des harmoniques de fréquences $f_s(1 \pm f_r)$.

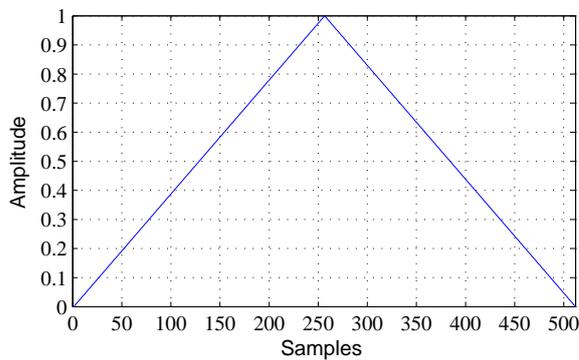
On peut conclure que la méthode de l'analyse spectrale du courant statorique permet d'établir le diagnostic de la machine par la surveillance de l'amplitude des harmoniques caractérisant les différents défauts et de distinguer entre les défauts électriques et mécaniques. Néanmoins, elle présente quelques inconvénients : l'amplitude des harmoniques dépend du niveau de charge et les oscillations du couple de charge engendrées par un déséquilibre de la charge mécanique ou des balourds ont pour conséquence l'augmentation des harmoniques de même fréquence que ceux des défauts mécaniques, ce qui peut mener à des erreurs de diagnostic.

D'autres travaux peuvent être effectués pour la séparation des défauts mécaniques des oscillations du couple en faisant appel à des méthodes complémentaires et une implémentation sur DSP peut être envisagée pour une surveillance en temps réel des machines.

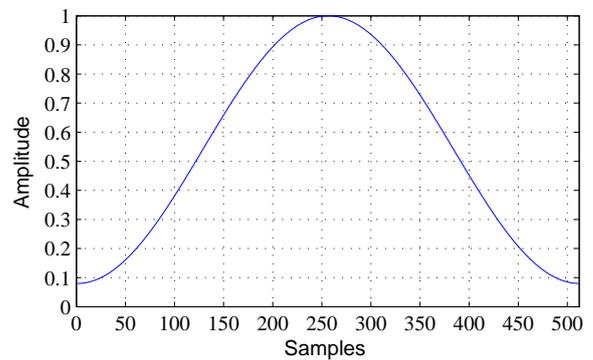
Annexe A

Choix des fenêtres

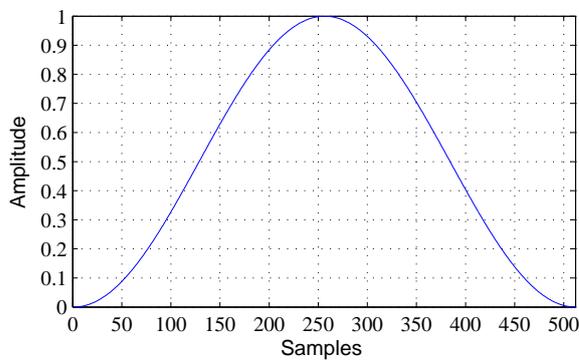
Pour le traitement des relevés expérimentaux, on utilise le spectrogramme de Welch et pour améliorer l'estimation du spectre, on prémultiplie les données par une fonction de fenêtrage [32, 31]. Plusieurs types de fenêtres existent, les plus couramment utilisées sont celle de Bartlett, Hamming, Hanning et Blackman (Figure A.1).



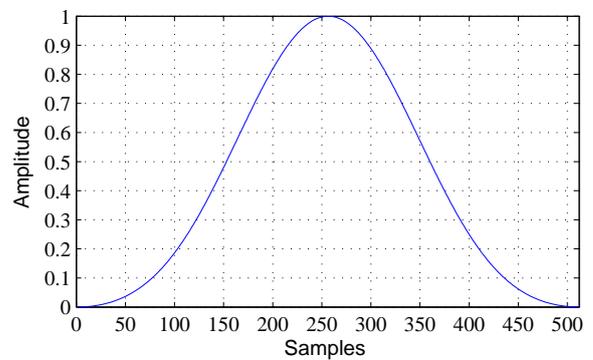
(a) Fenêtre de Bartlett



(b) Fenêtre de Hamming



(c) Fenêtre de Hanning



(d) Fenêtre de Blackman

FIG. A.1 – Les différentes fenêtres

Dans ce qui suit, nous allons voir l'effet des différentes fenêtres et de leurs longueurs sur un même signal de longueur N afin de choisir celles qui sont les plus adéquates.

A.1 Choix de la fenêtre pour l'analyse spectrale dans le diagnostic des défauts électriques

L'application des différentes fenêtres pour un même signal, nous permettent d'obtenir les différents spectres représentés sur la figure A.2.

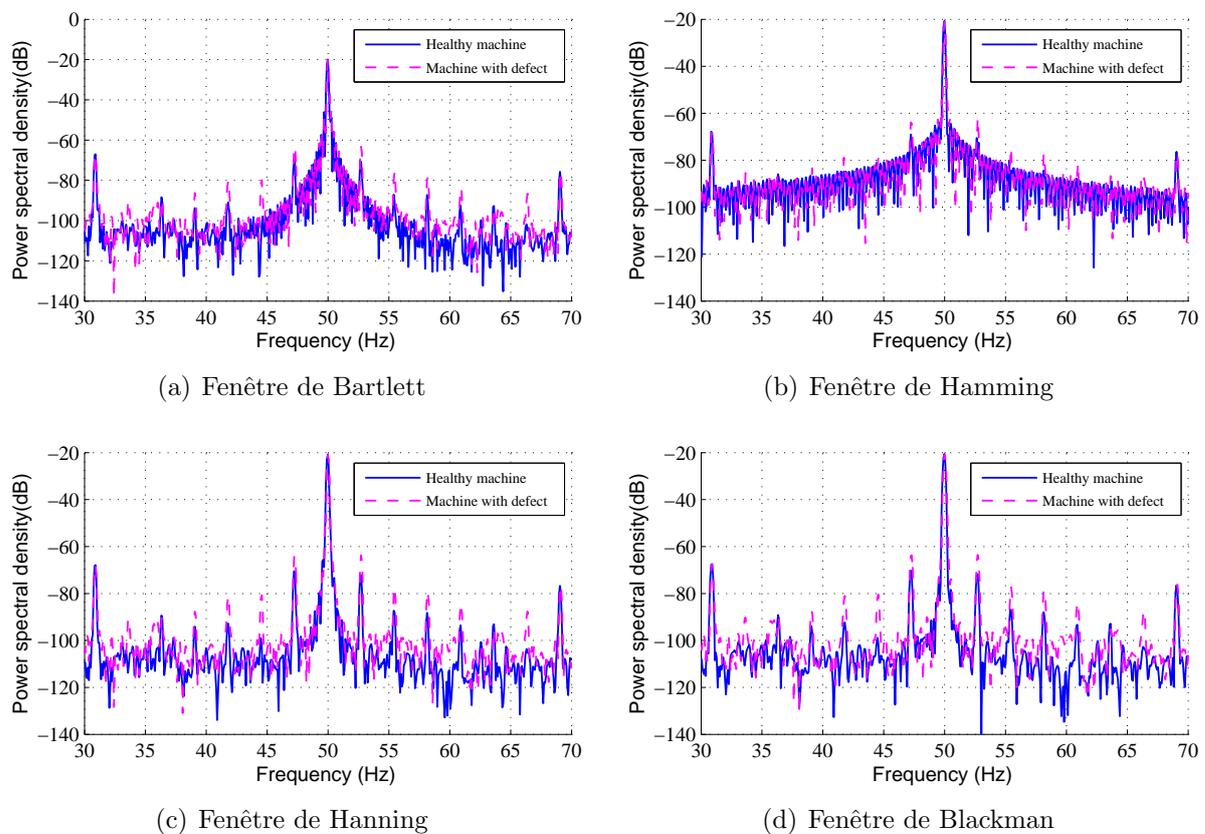


FIG. A.2 – Défauts électriques : Choix des fenêtres pour l'analyse spectrale

Dans le cas de la densité spectrale obtenue avec les fenêtres de Hamming et de Bartlett, comme on peut voir des figures A.2(b) et A.2(a), les lobes latéraux sont trop rapprochés d'où la difficulté de distinguer les pics caractérisant le défaut. Quand aux spectres obtenus en utilisant les fenêtres de Hanning et Blackman, ils permettent de distinguer les pics caractérisant le défaut des autres. Ainsi, les fenêtres les plus adéquates pour le diagnostic des défauts électriques sont celle de Hanning et Blackman.

Pour essayer d'améliorer la résolution du spectre, dans ce qui suit on va déterminer la

longueur de la fenêtre qui permet de mieux faire le diagnostic.

Comme on peut le voir de la figure A.3, la diminution de la longueur de la fenêtre a pour effet de lisser les lobes latéraux et de mieux distinguer les harmoniques de fréquences $f_s(1 \pm 2g)$ caractérisant le défaut, mais à partir de $\frac{N}{6}$ ces harmoniques commencent à disparaître. Ce qui nous amène à choisir la fenêtre de longueur $\frac{N}{2}$ qui est la plus appropriée.

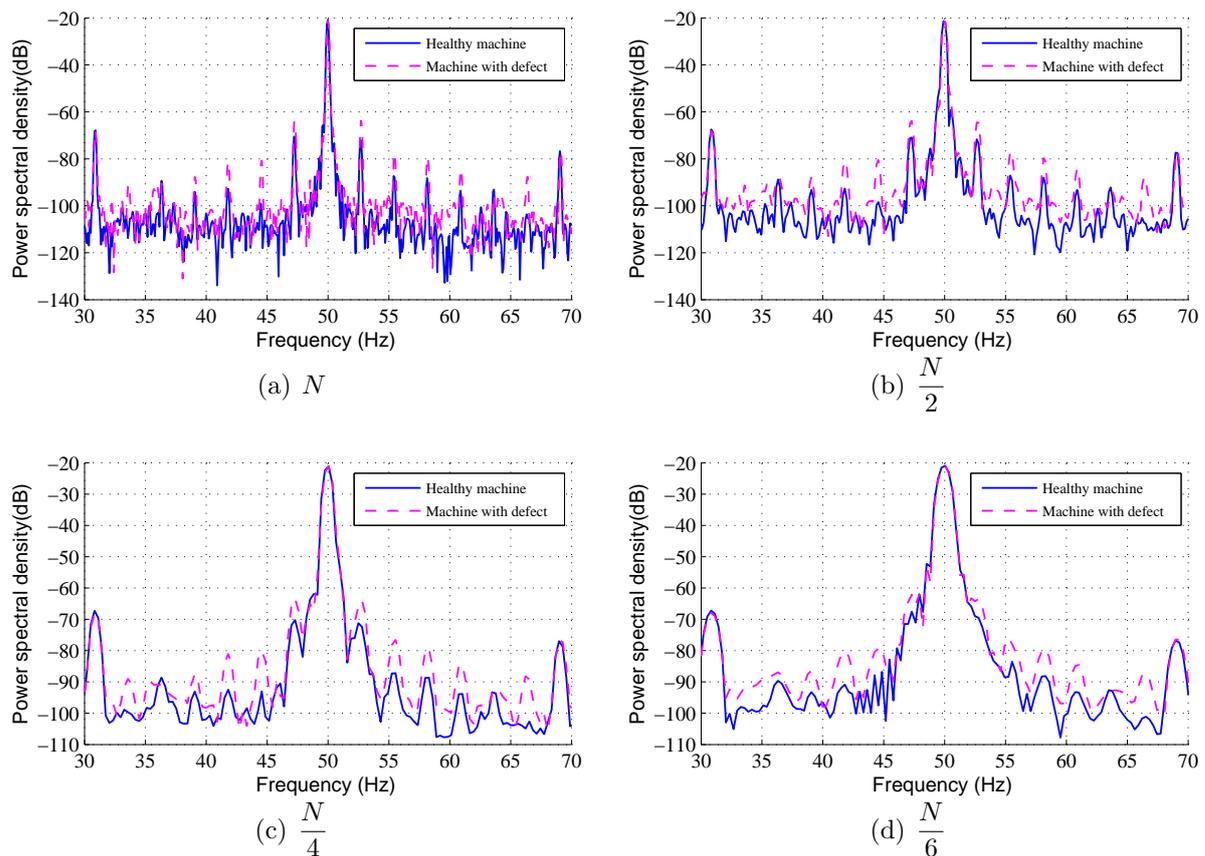


FIG. A.3 – Défauts électriques : Effet de la longueur de la fenêtre

A.2 Choix de la fenêtre pour l'analyse spectrale dans le diagnostic des défauts mécaniques

Pour le choix de la fenêtre et de sa longueur, on suit le même raisonnement que celui utilisé dans le cas du diagnostic des défauts électriques. De la figure A.4, on voit que les fenêtres de Hanning et Blackman sont toujours les plus adéquates. Quand à la longueur de la fenêtre (Figure A.5), on opte pour une longueur de $\frac{N}{8}$ qui permet de bien distinguer les harmoniques de fréquences $f_s \pm f_r$ caractérisant les défauts mécaniques.

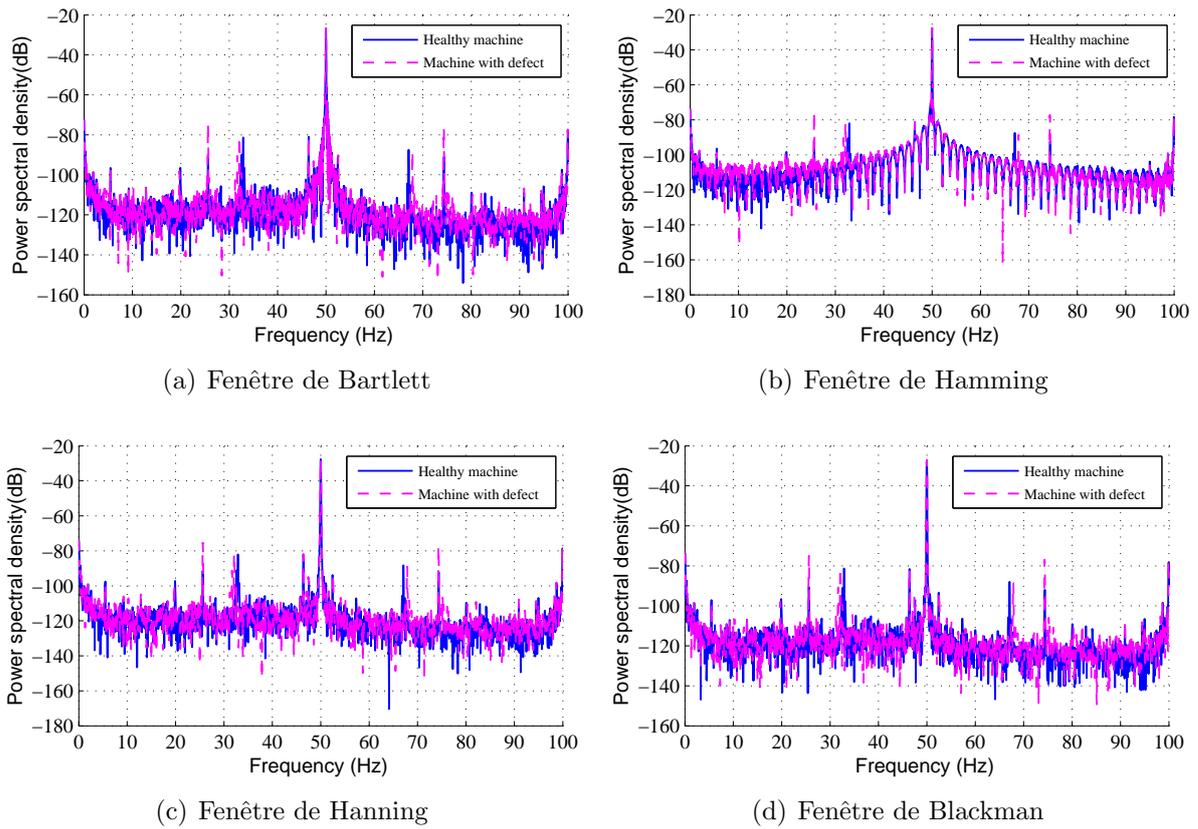


FIG. A.4 – Défauts mécaniques : Choix des fenêtres pour l'analyse spectrale

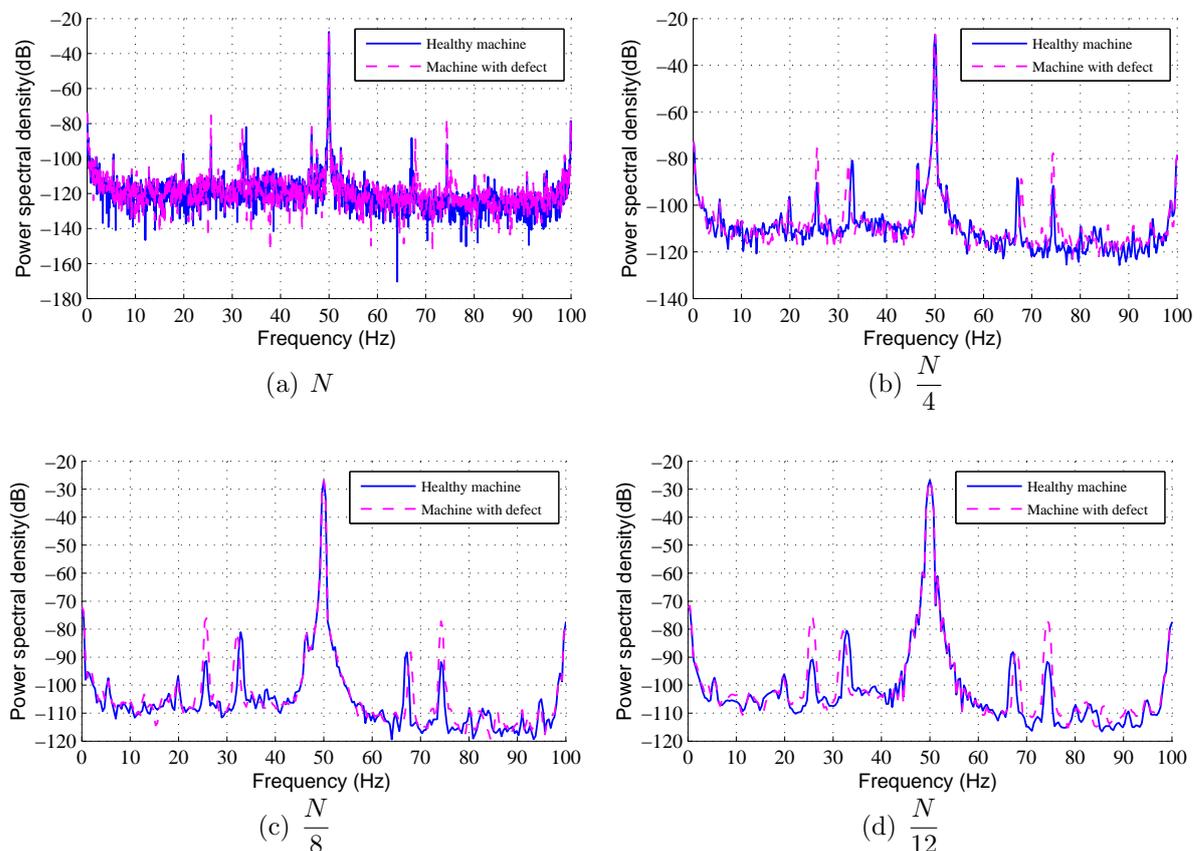


FIG. A.5 – Défauts mécaniques : Effet de la longueur de la fenêtre

Annexe B

Calcul des amplitudes des oscillations de couple et relevés expérimentaux

B.1 Calcul des amplitudes des oscillations du couple

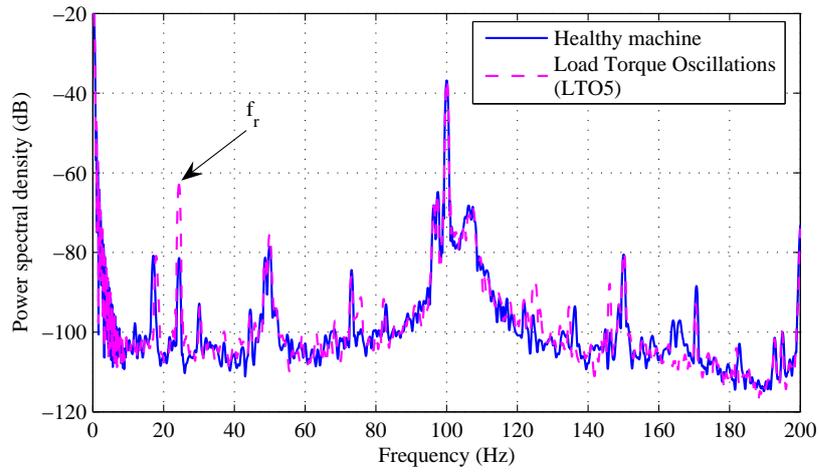
La plupart des défauts mécaniques de la machine asynchrone ont pour conséquence des oscillations du couple de fréquence dépendant de la fréquence de rotation du rotor (B.2). Ainsi l'expression de l'oscillation du couple peut être donnée par :

$$\Gamma_{osc} = \sum_{k=1}^{\infty} \Gamma_k \cos(2k\pi f_r t)$$

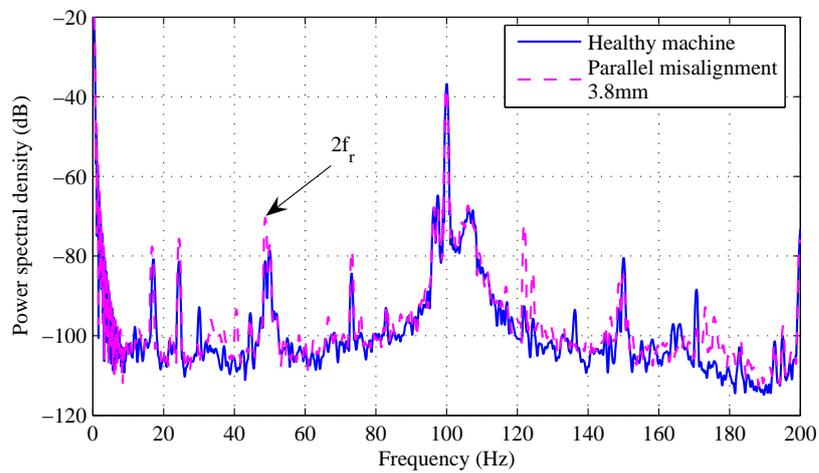
où

- Γ_k amplitude de l'oscillation d'ordre k ;
- f_r est la fréquence de rotation de l'arbre.

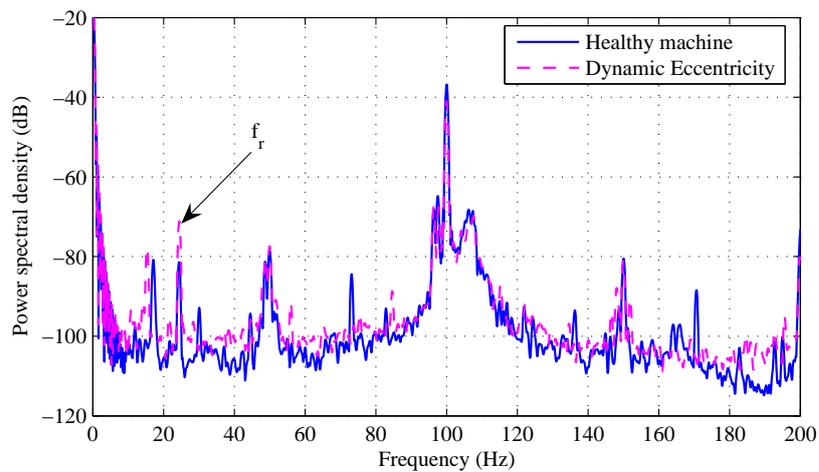
Pour l'estimation de l'amplitude des oscillations du couple on décompose le couple en série de Fourier, à partir de laquelle on tire la valeur de l'amplitude de l'harmonique de fréquence f_r qui nous permet de calculer l'amplitude des oscillations de couple de fréquence f_r . On s'intéresse à l'amplitude des oscillations de cette fréquence car elle peut induire des erreurs de diagnostic des défauts mécaniques



(a) Machine avec oscillation du couple de charge LTO5

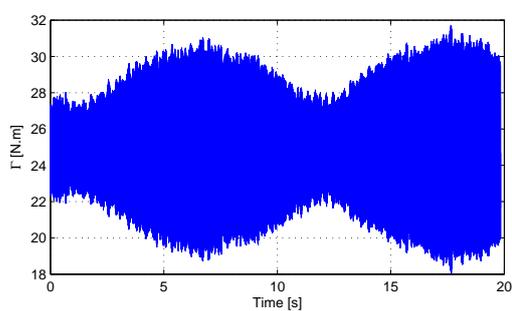


(b) Machine avec désalignement parallèle de 3.8 mm

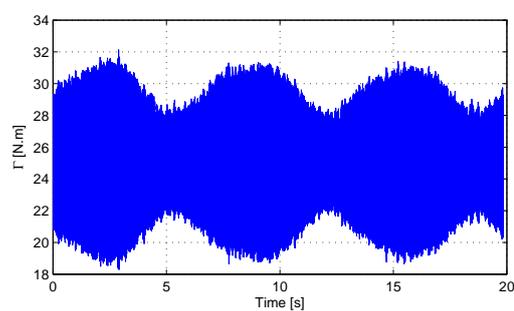


(c) Machine avec une excentricité dynamique d'environ 40%

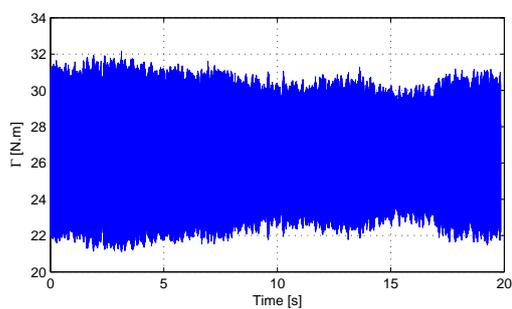
FIG. B.1 – Densité spectrale de puissance du couple



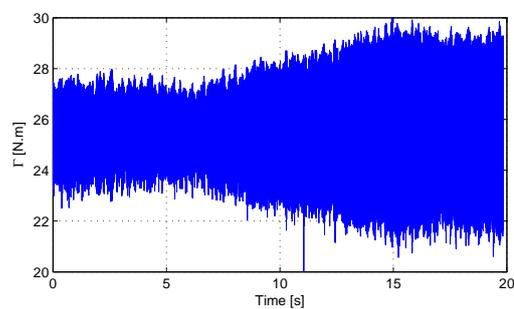
(a) Machine saine



(b) Machine avec oscillation du couple de charge LTO5



(c) Machine avec désalignement parallèle de 3.8 mm



(d) Machine avec une excentricité dynamique d'environ 40%

FIG. B.2 – Couple à 80% de charge

B.2 Relevés expérimentaux

Dans ce qui suit, on donne les différents relevés et figures utilisés dans ce travail.

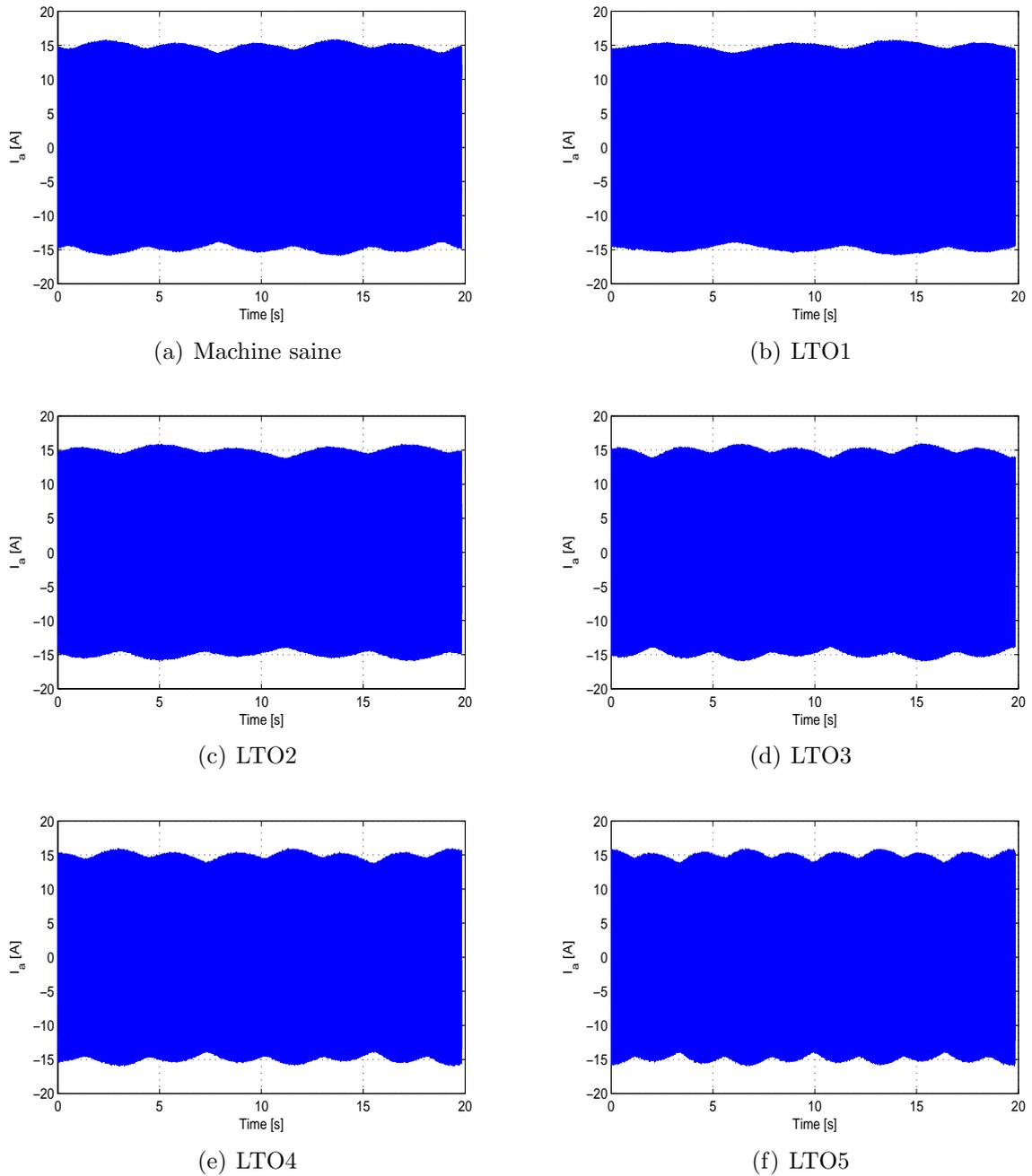
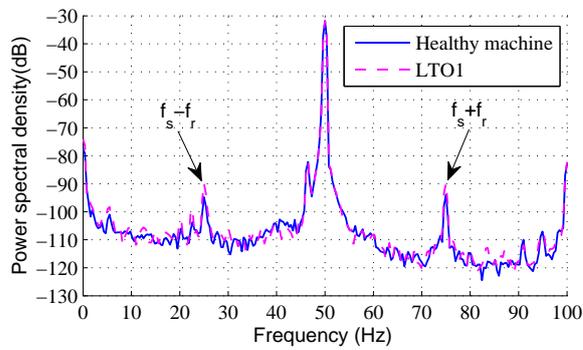
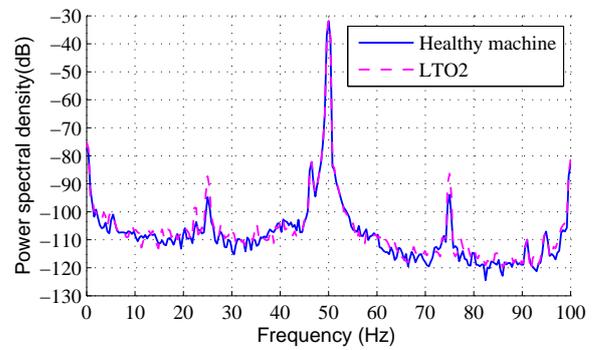


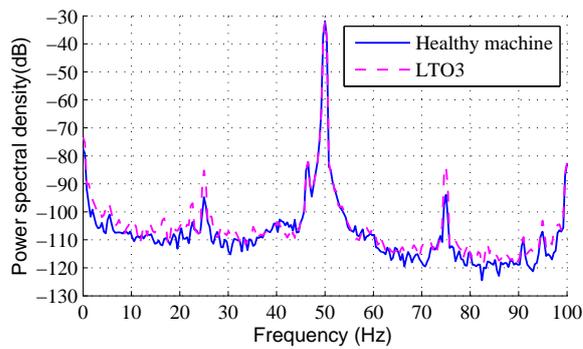
FIG. B.3 – Oscillation du couple de charge : Courant statorique à 80% de charge



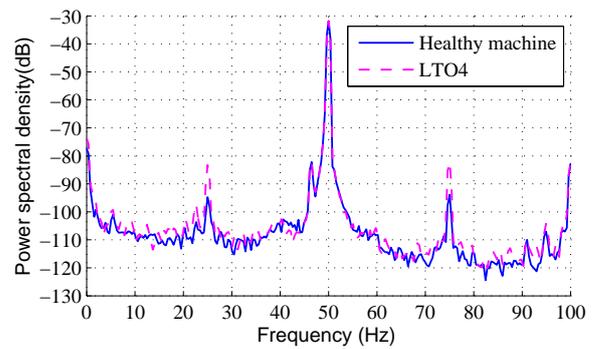
(a) Oscillation du couple de charge LTO1



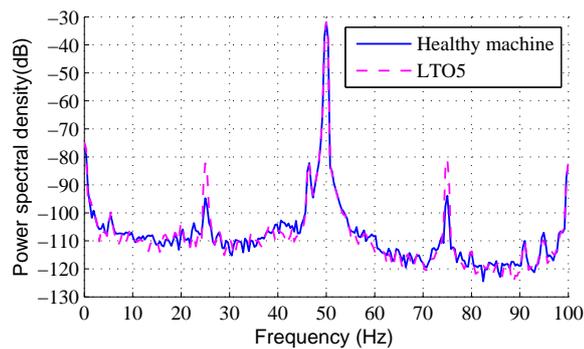
(b) Oscillation du couple de charge LTO2



(c) Oscillation du couple de charge LTO3

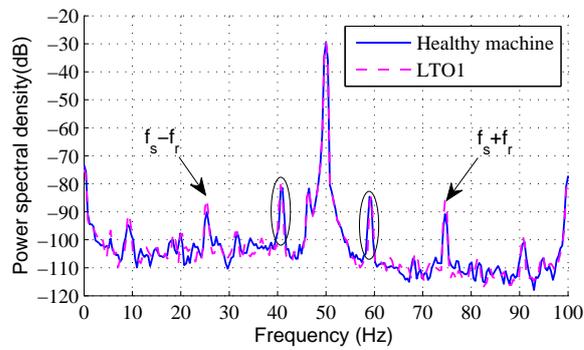


(d) Oscillation du couple de charge LTO4

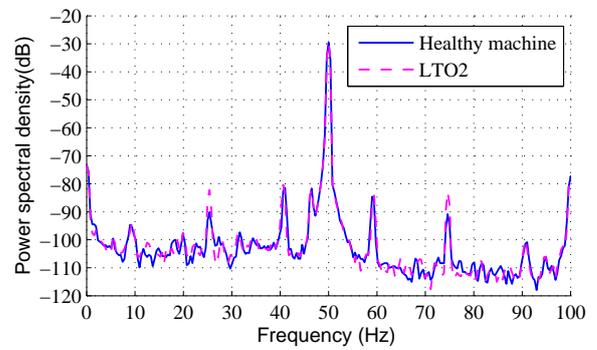


(e) Oscillation du couple de charge LTO5

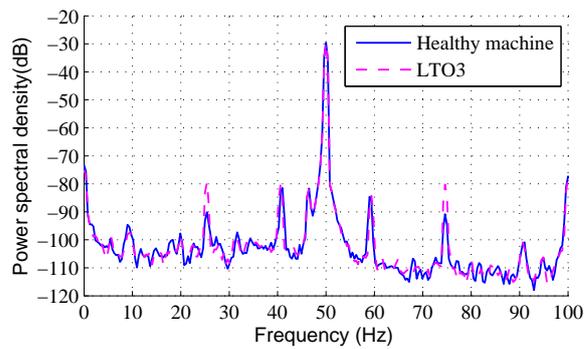
FIG. B.4 – Oscillation du couple de charge : Analyse spectrale du courant statorique à 10% de charge



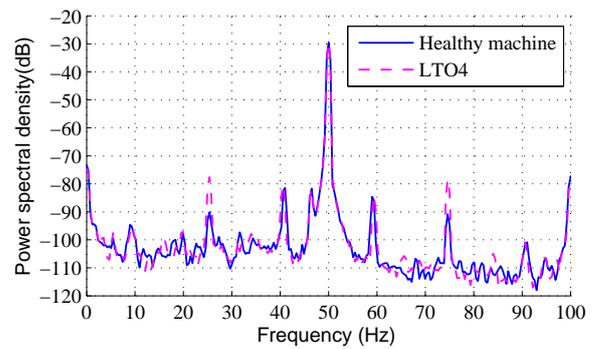
(a) Oscillation du couple de charge LTO1



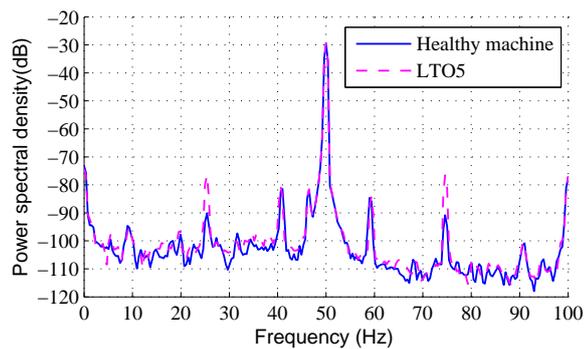
(b) Oscillation du couple de charge LTO2



(c) Oscillation du couple de charge LTO3

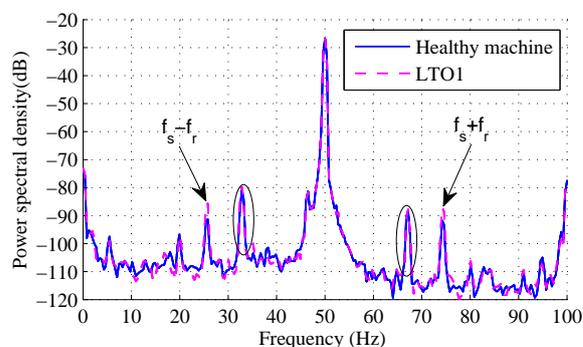


(d) Oscillation du couple de charge LTO4

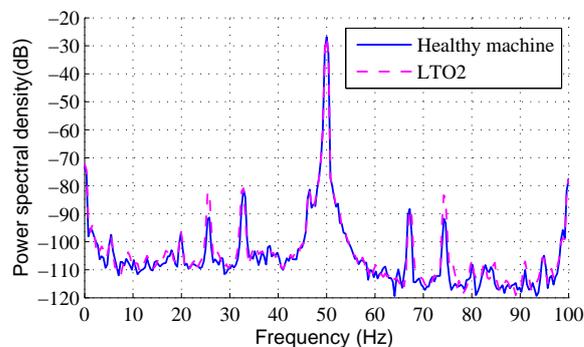


(e) Oscillation du couple de charge LTO5

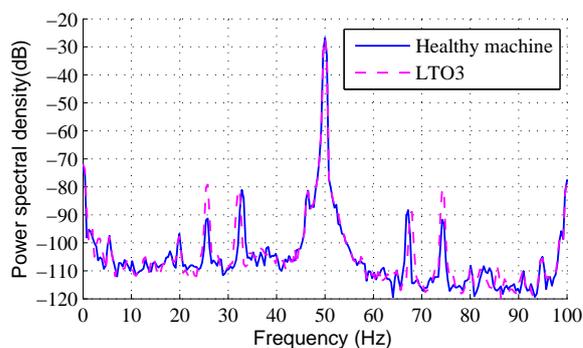
FIG. B.5 – Oscillation du couple de charge : Analyse spectrale du courant statorique à 50% de charge



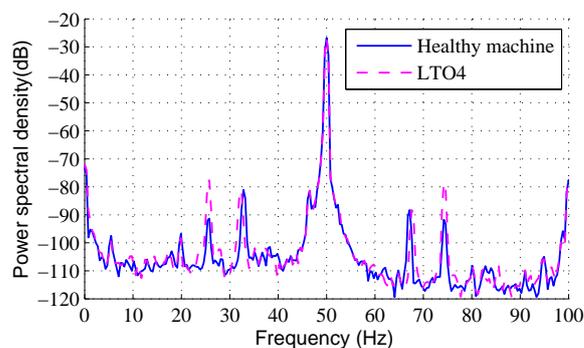
(a) Oscillation du couple de charge LTO1



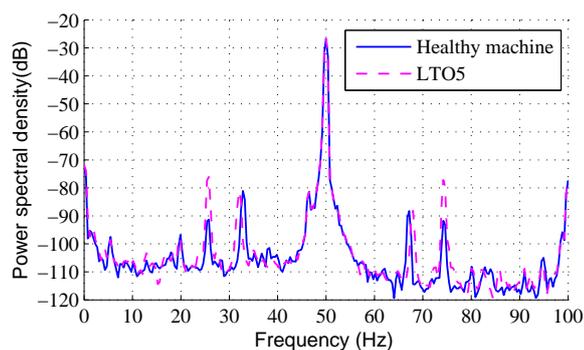
(b) Oscillation du couple de charge LTO2



(c) Oscillation du couple de charge LTO3

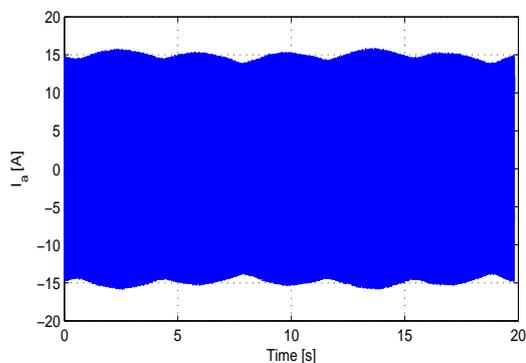


(d) Oscillation du couple de charge LTO4

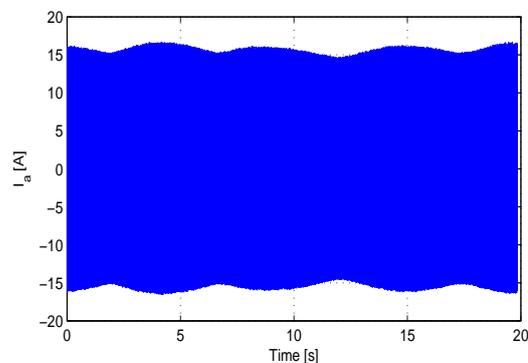


(e) Oscillation du couple de charge LTO5

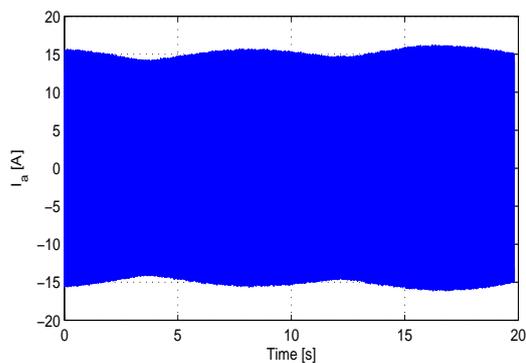
FIG. B.6 – Oscillation du couple de charge : Analyse spectrale du courant statorique à 80% de charge



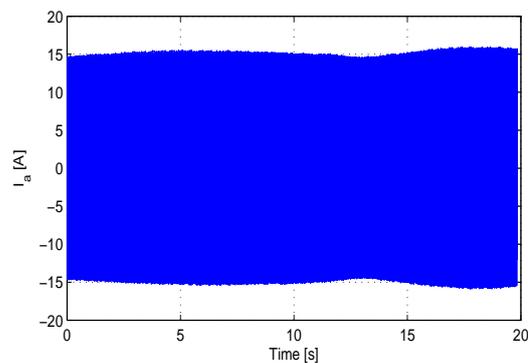
(a) Machine saine



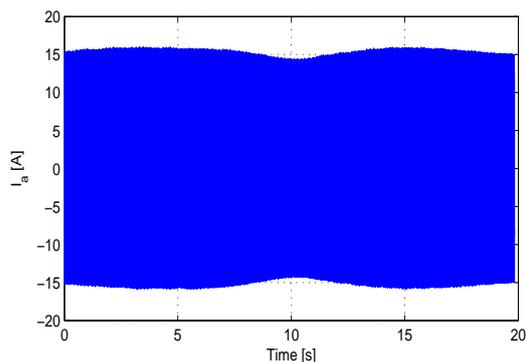
(b) Désalignement angulaire de 1.5 mm



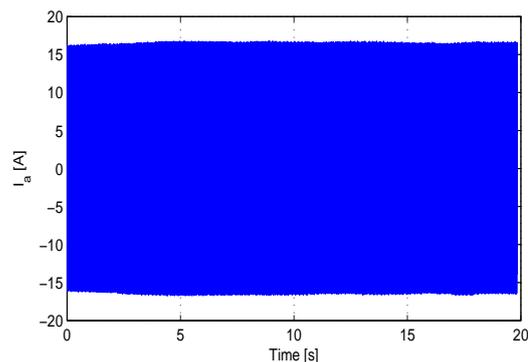
(c) Désalignement angulaire de 2.4 mm



(d) Désalignement parallèle de 2.0 mm

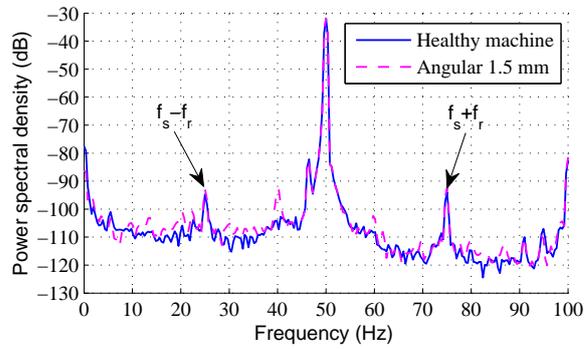


(e) Désalignement parallèle de 2.4 mm

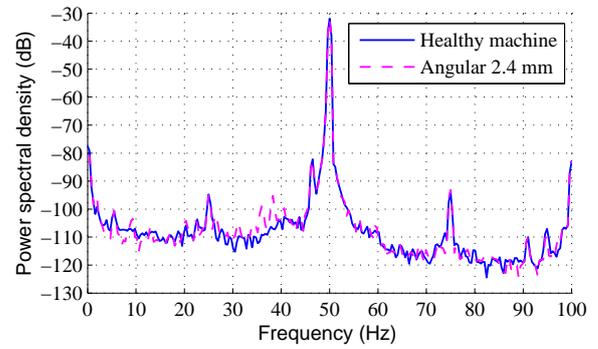


(f) Désalignement parallèle de 3.8 mm

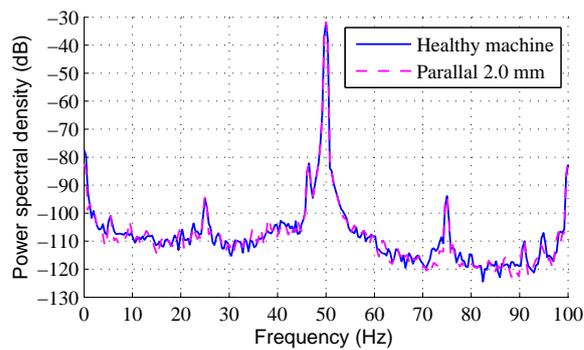
FIG. B.7 – Désalignement : Courant statorique à 80% de charge



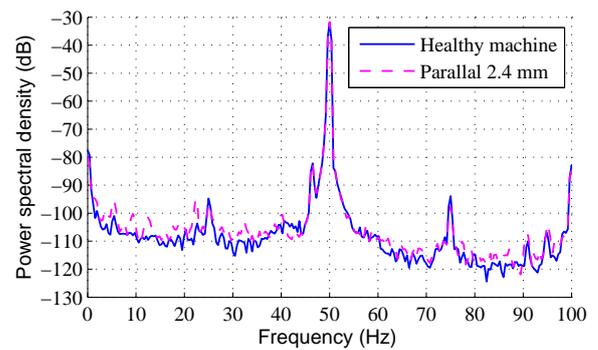
(a) Désalignement angulaire de 1.5 mm



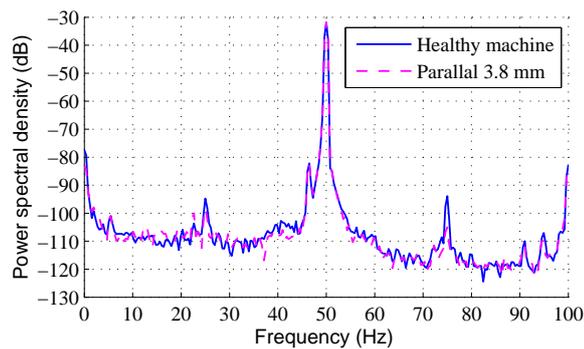
(b) Désalignement angulaire de 2.4 mm



(c) Désalignement parallèle de 2.0 mm

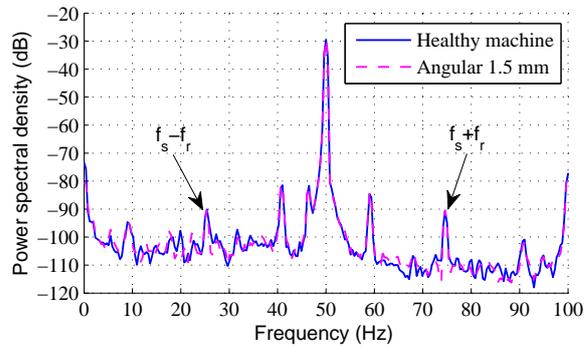


(d) Désalignement parallèle de 2.4 mm

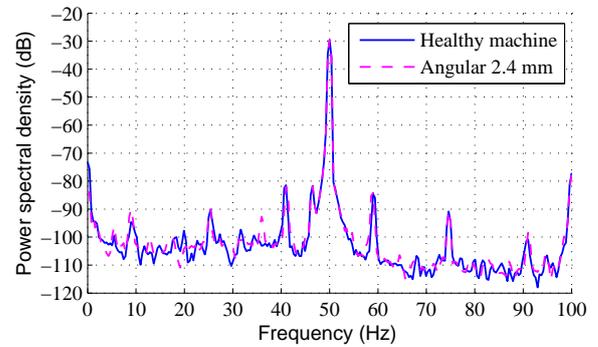


(e) Désalignement parallèle de 3.8 mm

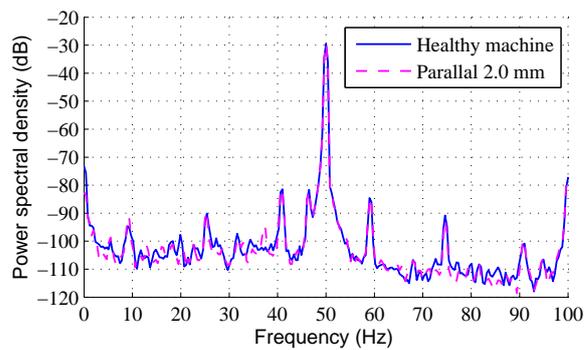
FIG. B.8 – Désalignement : Analyse spectrale du courant statorique à 10% de charge



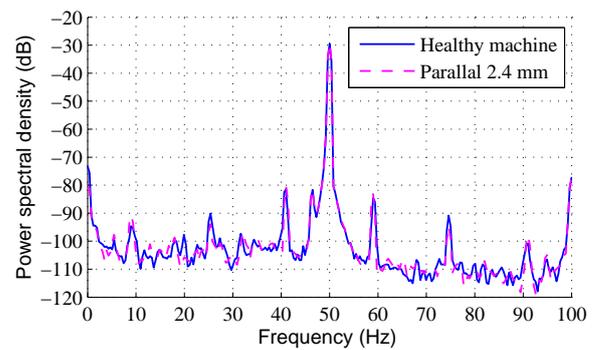
(a) Désalignement angulaire de 1.5 mm



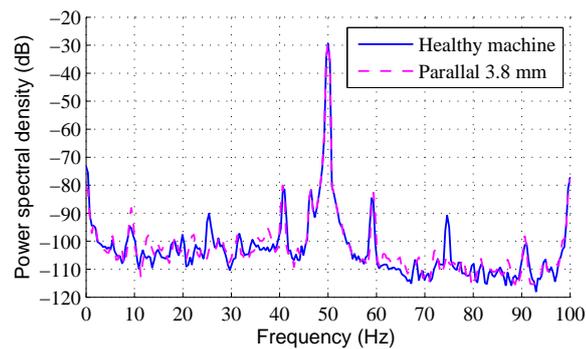
(b) Désalignement angulaire de 2.4 mm



(c) Désalignement parallèle de 2.0 mm

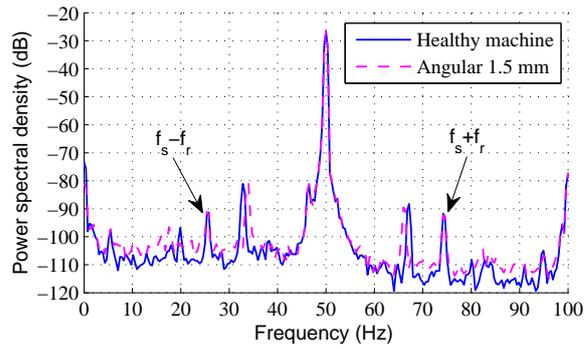


(d) Désalignement parallèle de 2.4 mm

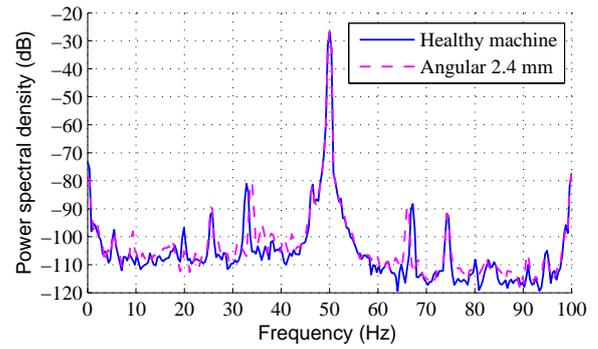


(e) Désalignement parallèle de 3.8 mm

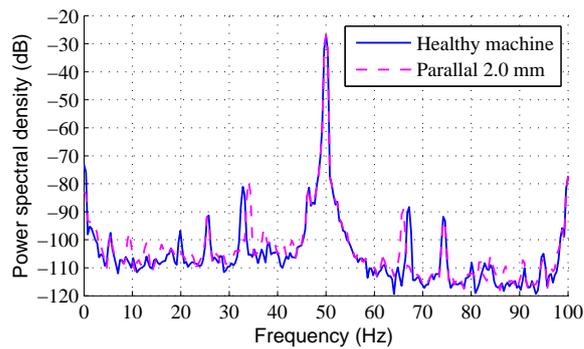
FIG. B.9 – Désalignement : Analyse spectrale du courant statorique à 50% de charge



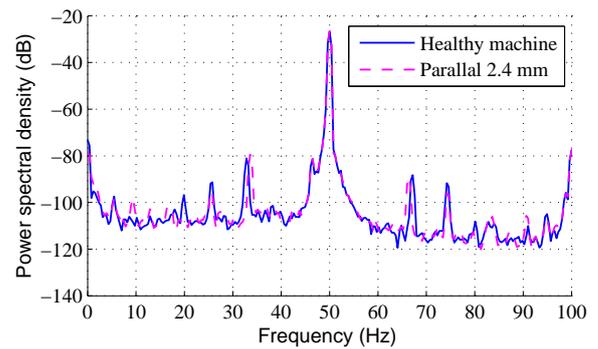
(a) Désalignement angulaire de 1.5 mm



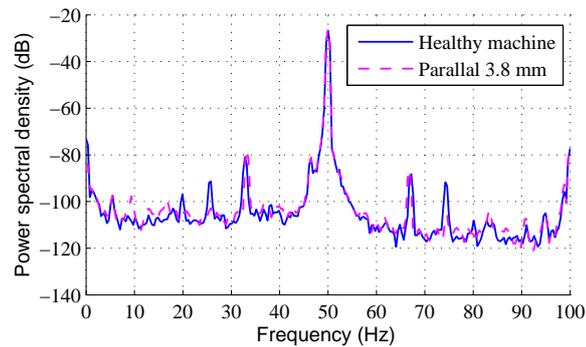
(b) Désalignement angulaire de 2.4 mm



(c) Désalignement parallèle de 2.0 mm

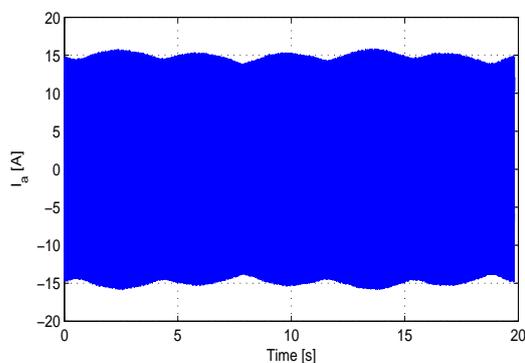


(d) Désalignement parallèle de 2.4 mm

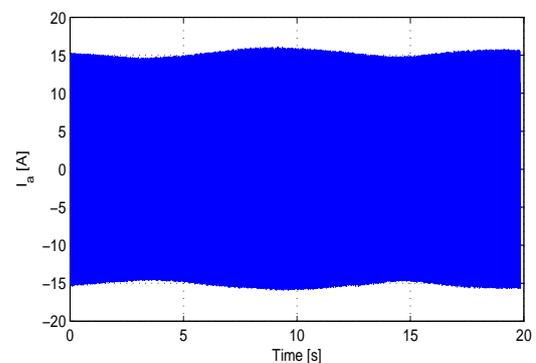


(e) Désalignement parallèle de 3.8 mm

FIG. B.10 – Désalignement : Analyse spectrale du courant statorique à 80% de charge



(a) Machine saine



(b) Excentricité dynamique (40%)

FIG. B.11 – Excentricité dynamique : Courant statorique à 80% de charge

Bibliographie

- [1] Brutsaert P., D. Laloy, P. Robert, and D. Verbeke. Construction des machines tournantes. éléments constitutifs. *Techniques de l'Ingénieur*, Février 2006.
- [2] Boldea I. and S. A. Nasar. *The Induction Machine Handbook*. CRC Press LLC, 2002.
- [3] Motor Reliability Working Group of IEEE. Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations : Part I & II. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 1A-21 :pp. 853–872, Jul./Aug. 1985.
- [4] Cornell E.P., E.L. Owen, J.C. Appiarius, R.M. McCoy, P.F. Albrecht, and D.W. Houghtaling. Improved motors for utility applications. final report. Technical Report EPRI-EL-2678-Vol.1, General Electric Co., Schenectady, NY (USA), October 1982.
- [5] Thorsen O.V. and M. Dalva. A survey of fault on induction motors in offshore oil industry, petrochemical, gaz terminals, and oil refineries. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31 :pp. 1186–1196, Sep./Oct. 1995.
- [6] Présentation des avaries. machines électriques tournante. *Cahier des prévention. CP2, Allianz*, 1988.
- [7] Bonnett A. H. Root cause AC motor failure analysis with a focus on shaft failures. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 36 :pp. 1435–1448, Sep./Oct. 2000.
- [8] Leon L. Fault zone analysis “ROTOR”. Motor reliability technical conference, PdMA Corporation, Technical Support & Training, 2007.
- [9] Walsh R. A. *Electromechanical design handbook*, chapter 8, pp. 139–141. McGRAW-HILL, 3 edition, 1999.
- [10] McMillan R.B. *Rotating machinery : Practical solutions to unbalance and misalignment*, chapter 4, pp. 97–108. New York : Marcel Dekker, 2004.

- [11] Thomson W.T. and R.J. Gilmore. Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives - fundamentals, data, interpretation, and industrial case histories. In *Proceedings of the thirty-second turbomachinery symposium*, pp. 145–156, 2003.
- [12] Negrea M.D. *Electromagnetic flux monitoring for detecting faults in electrical machines*. Doctoral dissertation, Helsinki University of Technology, 2006.
- [13] Bouzida H., O. Touhami, R. Ibtouen, M. Fadel, M. Benhaddadi, and Olivier G. Model structures used in rotor defect identification of a squirrel cage induction machine. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, IEEE CCECE '06*, pp. 1671–1676, May 2006. Ottawa, Ont.
- [14] Touhami O., N. Lahcene, R. Ibtouen, and M. Fadel. Modeling of the induction machine for the diagnosis of rotor defects. part. I : An approach of magnetically coupled multiple circuits. In *31st Annual Conference of Industrial Electronics Society, IEEE IECON '05*, pp. 1580–1585, Raleigh, NC, USA, May 2005.
- [15] Touhami O., N. Lahcene, R. Ibtouen, and M. Fadel. Diagnosis of induction machine rotor defects from an approach of magnetically coupled multiple circuits. In *IEEE Proceedings of the 38th Southeastern Symposium on System Theory Tennessee Technological University*, pp. 1992–1996, Cookeville, TN, USA, March 5-7 2006.
- [16] Touhami O., N. Lahcene, and R. Ibtouen. Spectral analysis for the rotor defects diagnosis of an induction machine. In *IEEE International Workshop on Intelligent Signal Processing*, pp. 183–187, Faro, Portugal, 1-3 September 2005.
- [17] Boumegoura T. *Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic*. PhD thesis, Ecole centrale de Lyon, France, 2001.
- [18] Bouzida A. and M.A. Boumaza. Diagnostic de défauts au rotor par l'approche de l'estimation paramétrique. Thèse d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2005.
- [19] Benabida F. and M. Ouadah. Diagnostic de défauts au stator et au rotor par estimation paramétrique de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Thèse d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2006.

-
- [20] Touhami O. and M. Fadel. Faults diagnosis by parameter identification of the squirrel cage induction machine. *International Electric Machines & Drives Conference, IEEE IEMDC '07*, pp. 821–825, 3-5 May 2007. Antalya.
- [21] Bachir S. *Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique*. PhD thesis, Ecole supérieur d'ingénieur de POITIERS, France, 1992.
- [22] Kabaodlu N. and A. Akan. Detection of machinery failure by using time-frequency analysis. *Journal of electrical & electronics*, Vol. 1, 2001. University of Istanbul, Department of Electrical and Electronics Engineering.
- [23] Blodt M. *Condition Monitoring of Mechanical Faults in Variable Speed Induction Motor Drives : Application of Stator Current Time-Frequency Analysis and Parameter Estimation*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2006.
- [24] Bouzida A. Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique des ondelettes. Thèse de magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Janvier 2008.
- [25] Merabet S. and D. Houssine. Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil par la méthode de reconnaissance des formes. Thèse d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2007.
- [26] Touhami O., N. Lahcene, R. Ibtouen, and M. Fadel. Modeling of the induction machine for the diagnosis of rotor defects. part. II : Simulation and experimental results. In *31st Annual Conference of Industrial Electronics Society, IEEE IECON 2005*, pp. 1621–1626, Raleigh, NC, USA, May 2005.
- [27] Fenger M. Susnik M., P. Laderoute, and W. T. Thomson. Development of a tool to detect faults in induction motors via current signature analysis. In *Iris Rotating Machine Conference*, Santa Monica, CANADA, June 2003.
- [28] Y. Önel I., K. B. Dalci, and I. Senol. Detection of outer raceway bearing defects in small induction motors using stator current analysis. In *Sādhanā*, Vol. 30, pp. 713–722. India, December 2005.
- [29] Rodriguez I. and R. Alves. Bearing damage detection of the induction motors using current analysis. In *Transmission & Distribution Conference and Exposition : To-*

- wards Regional Integration, Utilities Efficiency and Power Quality, IEEE PES*, pp. 1–5, 15-18 August 2006.
- [30] Zamastil M. Fault detection methods for condition monitoring of rotational mechanical systems. In *Summer Seminar on Nordic Network for Multi Disciplinary Optimised Electric Drives*, pp. 44–48, Koldkær Feriecenter, Denmark, August 2001. NORFA, AALBORG UNIVERSITY.
- [31] Vaseghi S. V. *Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction*. 2 edition, 2000.
- [32] Blanchet G. and M. Charbit. Traitement numérique du signal. *Techniques de l'Ingénieur, traité d'électronique*, Août 1998.