

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Ferhat Abbas- Sétif 1

Institut : Optique et Mécanique de Précision

Département : Mécanique de Précision

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Optique et Mécanique de Précision

Spécialité : Mécanique fine

Mémoire de Master

Surveillance et Pronostic de défaillances d'alignement d'arbres

Etudié par : MADANI Aissa

Dirigé Par : Pr : FELKAOUI Ahmed

Devant le jury :

Dr : OURAHMOUN Abbes	(Président)
Dr : FIZI Yazid	(Examineur)
Dr : MEZAACHE	(Examineur)

Soutenu le : 14/09/2022

Remerciements

Louange à Dieu puisque par sa grâce et sa miséricorde sont accomplies les bonnes actions et sont concrétisés les vœux et les projets. Loué soit-il de m'avoir aidé à accomplir ce modeste travail. Loué soit-il d'abord et avant tout.

Je tiens à remercier mon encadrant Mr. FELKAOUI Ahmed, Professeur de mécanique, Université FERHAT Abbas Sétif 1, Institut d'Optique et Mécanique de Précision, qui a accepté de diriger ce mémoire et qui aura viellé à rendre possible ce travail. Merci de m'avoir si précieusement conseillé avec patience et sagesse. Je le remercie de m'avoir guidé avec beaucoup d'attention que Dieu tout-puissant le protège. Je remercie également les professeurs qui ont accepté de former mon jury, merci de cet honneur que vous m'accordez.

Je remercie mes généreux parents, auxquels je dois tout, jamais je ne pourrai leur exprimer toute ma gratitude, aussi longtemps que je vivrai. Je prie Dieu de les récompenser, de les préserver et de maintenir leur santé et leur bien-être. Je remercie également vivement mes sœurs et mes frères. et grande gratitude à toute ma famille.

Je remercie tous les enseignants et professeurs que j'ai eu la chance d'avoir au cours de ma carrière. J'adresse des remerciements particuliers à mes estimés professeurs de l'Institut d'optique et de mécanique de précision. Je remercie aussi le directeur de notre institut, tout le personnel administratif et les fonctionnaires.

Enfin, je remercie tous mes amis de leur soutien et de leur encouragement, et je remercie sincèrement mes camarades étudiants qui m'ont souvent aidé et appuyé. En particulier, je voudrais citer mon ami, doctorant BENYAGOUB Abderrahmane qui m'a aidé dans ce travail avec ses précieux conseils.

Sommaire

Remerciement	I
Liste des figures.....	II
Liste des tableaux.....	III
Résumé.....	IV
Introduction général.....	1

Chapitre I : Délignage

Introduction	3
1. Définition du délignage	3
1.1 Désalignement angulaire	4
1.2 Désalignement parallèle (radial)	4
2. Causes des délignages	5
3. Conséquences du désalignement	5
4. Techniques du diagnostic	5
4.1 Diagnostique via le système d'alignement d'arbres au laser	5
4.2 Diagnostique par Analyse vibratoire	7
4.3 Diagnostique par Thermographie	7
4.4 Diagnostique par Analyse d'huile	7
5. Méthodes simples de contrôle de l'alignement.....	7
5.1 Méthode avec calibre à lame conique graduée ou avec coin gradué	8
5.2 Méthode avec règle et calibre d'épaisseur	8
5.3 Méthode avec comparateur à cadran	9
Conclusion	10

Chapitre II : Analyse vibratoire des délignages

Introduction	11
1. La surveillance vibratoire.....	11
2. Les indicateurs des vibrations	12
2.1 Surveillance par suivi d'indicateurs scalaire « larges bandes » dite en « niveau global »	12

2.2 Surveillances par suivi d'indicateurs scalaires « bandes étroites » dite par « bandes de fréquences »	13
2.3 Surveillance par le suivi de l'Orbite	14
2.4 Suivi d'évolution d'images spectrales par comparaison avec un gabarit	14
3. Techniques d'exploitation	14
3.1 Indicateurs scalaires	15
3.1.1 La valeur efficace (RMS : Root Mean Square)	15
3.1.2 La valeur de pic	16
3.1.3 Orbite	16
3.2 Indicateurs spectraux	17
3.2.1 Analyse spectrale	17
3.2.2 Problème de résolution fréquentielle	19
Conclusion	21

Chapitre III : Application des méthodes de traitement du signal

Introduction	22
1. Description du banc d'essai	22
2. Acquisition des signaux	23
3. Base de données des signaux	23
4. Spectres théoriques des défauts du banc	25
4.1 Balourd	25
4.2 Désalignement	26
4.2.1 Désalignement radial	26
4.2.2 Désalignement angulaire	26
4.3 Roulement	27
4.3.1 Défaut de type écaillage affectant la bague externe.....	27
4.3.2 Défaut de type écaillage affectant la bague interne.....	28
4.3.3 Défaut de type écaillage sur un élément roulant.....	28
4.3.4 Défaut de type déversement de bague extérieur.....	29
4.4 Moteur.....	29
4.4.1 Défauts électromagnétiques sut stator (défauts stationnaires)	29

4.4.2	Observations autour de la fréquence de rotation.....	31
4.4.3	Défaut de type barres cassées ou fissurées.....	32
5.	Spectres calculés des signaux du banc pour le défaut de délignage.....	33
5.1	Aucun délignage.....	33
5.1.1	Capteur axial, vitesse de rotation de l'arbre $fr = 12,288Hz$	33
5.1.2	Capteur horizontal, vitesse de rotation de l'arbre $fr = 12,288Hz$	34
5.1.3	Capteur vertical, vitesse de rotation de l'arbre $fr = 12,288Hz$	34
5.2	Délignage vertical.....	34
5.2.1	Capteur axial, vitesse de rotation de l'arbre $fr = 12,288Hz$	34
5.2.1.1	Interprétation.....	35
5.2.2	Capteur horizontal, vitesse de rotation de l'arbre $fr = 12,288Hz$	36
5.2.2.1	Interprétation.....	37
5.2.3	Capteur vertical, vitesse de rotation de l'arbre $fr = 12,288Hz$	37
5.3	Délignage horizontal.....	37
5.3.1	Capteur axial, vitesse de rotation de l'arbre $fr = 12,288Hz$	37
5.3.1.1	Interprétation.....	38
5.3.2	Capteur horizontal, vitesse de rotation de l'arbre $fr = 12,288Hz$	39
5.3.2.1	Interprétation.....	39
Conclusion.....		40

Chapitre IV : Pronostic

Introduction.....	41
1. Définition de pronostic.....	41
2. Classification des méthodes de pronostics.....	42
2.1 Approches basées sur les modèles physiques.....	42
2.2 Approches basées les données.....	43
2.3 Approches basées sur l'expérience.....	43
3 La durée de vie utile restante (RUL : Remaining Useful Life).....	45

4 Les méthodes d'ajustement.....	46
4.1 Interpolation linéaire.....	46
4.1.1 Modèle linéaire simple.....	46
4.1.2 Droite de régression.....	46
4.2 Interpolation exponentielle.....	47
4.3 Interpolation polynomiale.....	48
4.3.1 Courbe de tendance des valeurs efficaces.....	48
a. Interpolation polynomiale pour un décalage vertical.....	48
a.1 valeur efficace, $fr = 12,288 \text{ Hz}$	48
a.2 valeur efficace, $fr = 35,4305 \text{ Hz}$	50
b. Interpolation polynomiale pour un décalage horizontal.....	51
b.1 valeur efficace, $fr = 12,288 \text{ Hz}$	51
b.2 valeur efficace, $fr = 35,4305 \text{ Hz}$	51
4.3.2 Courbe de tendance des du 2 ^{ème} pics.....	52
c. Interpolation polynomiale pour un décalage vertical.....	52
c.1 valeurs du 2 ^{ème} pics, $fr = 12,288 \text{ Hz}$	52
c.2 valeurs du 2 ^{ème} pics, $fr = 35,4305 \text{ Hz}$	53
d. Interpolation polynomiale pour un décalage horizontal.....	53
d.1 valeurs du 2 ^{ème} pics, $fr = 12,288 \text{ Hz}$	53
d.2 valeurs du 2 ^{ème} pic, $fr = 35,4305 \text{ Hz}$	54
4.3.3 Courbe de tendance des valeurs crête à crête.....	54
e. Interpolation polynomiale pour un décalage vertical.....	54
e.1 valeurs crête à crête, $fr = 12,288 \text{ Hz}$	54
e.2 valeur crête à crête, $fr = 35,4305 \text{ Hz}$	54
f. Interpolation polynomiale pour un décalage horizontal.....	55
f.1 valeurs crête à crête, $fr = 12,288 \text{ Hz}$	55
f.2 valeur crête à crête, $fr = 35,4305 \text{ Hz}$	56
4.3.4 Interprétation.....	57
Conclusion.....	57
Conclusion générale.....	58

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Type de délignage.....	4
Figure I.2 : Spectre typique de désalignement angulaire.....	4
Figure I.3 : Spectre typique de désalignement parallèle.....	5
Figure I.4 : Méthode de control par rayon laser.....	6
Figure I.5 : Méthode avec coin gradué.....	8
Figure I.6 : Méthode avec règle et calibre d'épaisseur.....	8
Figure I.7 : Première méthode de contrôle au comparateur.....	9
Figure I.8 : Deuxième méthode de contrôle au comparateur.....	10

Chapitre II

Figure II.1 : Classification des indicateurs de surveillance.....	12
Figure II.2 : Chaîne de mesure du niveau global.....	13
Figure II.3 : Surveillance par suivi d'évolution spectrale avec déclenchement d'alarme par dépassement de gabarit.....	14
Figure II.4 : L'évolution des valeurs crête et efficace.....	16
Figure II.5 : Orbite cinétique constituée à partir des mesures de deux capteurs montés à 90° l'un de l'autre. Chaque vibration contient deux fréquences fr et $2 fr$	16
Figure II.6 : Orbite cinétique d'un défaut d'alignement d'arbre ou de palier avant l'intervention.....	17
Figure II.7 : Transformée de Fourier d'une somme de deux sinusoïdes.....	18
Figure II.8 : Représentations d'un spectre.....	19
Figure II.9 : Principe de zoom.....	20
Figure II.10.a : Spectre [0-1 000 Hz ; Nb de lignes spectrales : 400] représentant le spectre vibratoire d'un palier PV d'un réducteur. La raie prédominante correspond à la fréquence d'engrènement du train PV/GV.....	20
Figure II.10.b : Le spectre zoomé autour de la composante d'engrènement. [Fréquence centrale : 289 Hz ; Bande d'analyse 125 Hz ; Nb de lignes spectrales : 400] révèle la présence de nombreuses composantes (bandes latérales de modulation) dont l'espacement correspond à la fréquence de rotation de l'arbre PV.....	20

Chapitre III

Figure III.1 : Montage expérimental pour obtenir le jeu de données MaFaulDa.....	22
Figure III.2 : Spectre théorique d'un défaut de balourd.....	25
Figure III.3 : Image vibratoire d'un défaut d'alignement radial.....	26
Figure III.4 : Images vibratoires d'un défaut d'alignement angulaire.....	27
Figure III.5 : Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague extérieure....	27
Figure III.6 : Image vibratoires théorique d'un défaut de type écaillage sur bague intérieure.....	28
Figure III.7 : Image vibratoires théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant.....	28
Figure III.8 : Défaut de type déversement de bague extérieure.....	29
Figure III.9 : Image vibratoires théorique d'un défaut de type déversement de bague extérieure.....	29
Figure III.10 : Variation de l'entrefer statique dû à une dégradation du stator.....	30
Figure III.11 : Image vibratoire théorique d'un défaut dû à une anomalie électromagnétique affectent le stator.....	30
Figure III.12 . Image vibratoire théorique d'un stator en bonne état.....	30
Figure III.13 . Image vibratoire théorique d'une excentricité statique d'entrefer.....	31
Figure III.14 . Image vibratoire théorique d'un défaut rotorique modulant la fréquence de rotation.....	32
Figure III.15 . Analyse en mode zoom autour de la fréquence de rotation d'un rotor de centrifugeuse.....	32
Figure III.16 . Barre de rotor et stator cassée.....	32
Figure III.17 : Image vibratoire théorique d'un défaut de type barre fissurée.....	33
Figure III.18 : Signal et spectre d'amplitude, capteur axial (cas sans défaut).....	33
Figure III.19 : Signal et spectre d'amplitude, capteur horizontal (cas sans défaut).....	34
Figure III.20 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage vertical = 0,51 mm.....	34
Figure III.21 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage vertical = 0,63 mm.....	34
Figure III.22 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage vertical = 1,27 mm.....	35
Figure III.23 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage vertical = 1,40 mm.....	35
Figure III.24 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage vertical = 1,78 mm.....	35

Figure III.25 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage vertical = 1,90 mm.....	35
Figure III.26 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage vertical = 0,51 mm.....	36
Figure III.27 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage vertical = 0,63 mm.....	36
Figure III.28 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage vertical = 1,27 mm.....	36
Figure III.29 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage vertical = 1,40 mm.....	36
Figure III.30 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage vertical = 1,78 mm.....	37
Figure III.31 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage vertical = 1,90 mm.....	37
Figure III.32 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage horizontal = 0,50 mm.....	38
Figure III.33 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage horizontal = 1,0 mm.....	38
Figure III.34 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage horizontal = 1,5 mm.....	38
Figure III.35 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage horizontal = 2,0 mm.....	38
Figure III.36 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage horizontal = 0,50 mm.....	39
Figure III.37 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage horizontal = 1,0 mm.....	39
Figure III.38 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage horizontal = 1,5 mm.....	39
Figure III.39 : signal et spectre d'amplitude pour un décalage horizontal = 2,0 mm.....	39

Chapitre IV

Figure IV.1 : Synthèse de classification des approches.....	44
Figure IV.2 : Détermination de temps de vie restant par le suivi de la tendance d'un paramètre de surveillance.....	45
Figure IV.3 : Régression linéaire.....	47
Figure IV.4 : Régression exponentielle.....	47
Figure IV.5 : Interpolation polynomiale de la valeur efficace pour un décalage vertical et vitesse de rotation $fr = 12,288 \text{ Hz}$	49
Figure IV.6 : Interpolation polynomiale de la valeur efficace pour un décalage vertical et vitesse de rotation $fr = 35,4305 \text{ Hz}$	51
Figure IV.7 : Interpolation polynomiale de la valeur efficace pour un décalage horizontal et vitesse de rotation $fr = 12,288 \text{ Hz}$	51
Figure IV.8 : Interpolation polynomiale de la valeur efficace pour un décalage horizontal et vitesse de rotation $fr = 35,4305 \text{ Hz}$	51
Figure IV.9 : Interpolation polynomiale des valeurs du 2 ^{ème} pic pour un décalage vertical et vitesse de rotation $fr = 12,288 \text{ Hz}$	52
Figure IV.10 : Interpolation polynomiale des valeurs du 2 ^{ème} pic pour un décalage vertical et vitesse de rotation $fr = 35,4305 \text{ Hz}$	53

Figure IV.11 : Interpolation polynomiale des valeurs du 2 ^{ème} pic pour un décalage horizontal et vitesse de rotation $fr = 12,288 \text{ Hz}$	53
Figure IV.12 : Interpolation polynomiale des valeurs du 2 ^{ème} pic pour un décalage horizontal et vitesse de rotation $fr = 35,4305 \text{ Hz}$	54
Figure IV.13 : Interpolation polynomiale des valeurs du crête à crête pour un décalage vertical et vitesse de rotation $fr = 12,288 \text{ Hz}$	54
Figure IV.14 : Interpolation polynomiale des valeurs du crête à crête pour un décalage vertical et vitesse de rotation $fr = 35,4305 \text{ Hz}$	55
Figure IV.15 : Interpolation polynomiale des valeurs du crête à crête pour un décalage Horizontal et vitesse de rotation $fr = 12,288 \text{ Hz}$	55
Figure IV.16 : Interpolation polynomiale des valeurs du crête à crête pour un décalage Horizontal et vitesse de rotation $fr = 35,4305 \text{ Hz}$	56