

Table des matières

Avant-propos	1
Introduction	3
Chapitre 1. La maintenance prédictive	5
1.1. Introduction.	5
1.2. Politiques de maintenance	5
1.3. Maintenance préventive	6
1.4. Maintenance préventive conditionnelle	6
1.4.1. Définition.	6
1.4.2. Les avantages de la maintenance conditionnelle.	7
1.4.2.1. Avantages sur le service maintenance.	7
1.4.2.2. Avantages sur la production	7
1.5. Maintenance préventive prévisionnelle	7
1.5.1. Définition.	7
1.5.2. Objectifs	8
1.6. Maintenance prédictive en relation avec l'industrie 4.0.	8
1.7. Outils de surveillance de l'état des machines	9
1.8. Conclusion	10
Chapitre 2. Vibrations des machines tournantes : origines et nature	11
2.1. Introduction.	11
2.2. Origines des vibrations	11

2.3. Le signal vibratoire	12
2.3.1. Définition.	12
2.3.2. Amplitude du signal vibratoire	13
2.3.3. Les grandeurs utilisées	14
2.3.3.1. Le déplacement	15
2.3.3.2. La vitesse	15
2.3.3.3. L'accélération.	15
2.3.3.4. Les relations entre les grandeurs	15
2.3.4. Nature d'une vibration	16
2.3.4.1. Les vibrations harmoniques.	16
2.3.4.2. Les vibrations périodiques non harmoniques	17
2.3.4.3. Les vibrations périodiques de type impulsionnel	17
2.3.4.4. La vibration aléatoire de type impulsionnel	18
2.3.4.5. Chocs transitoires.	18
2.4. Les capteurs de vibration	19
2.4.1. Le capteur de déplacement ou proximètre	20
2.4.2. Le vélocimètre.	21
2.4.3. Le vélocimètre laser à effet doppler	22
2.4.4. L'accéléromètre	22
2.4.4.1. L'accéléromètre piézoélectrique	23
2.4.4.2. L'accéléromètre piézorésistif.	24
2.4.4.3. L'accéléromètre à fibre optique	24
2.4.4.4. L'accéléromètre électronique.	24
2.4.4.5. La bande passante	25
2.5. Les points de mesures des vibrations sur machines	27
2.6. Conclusion	27

Chapitre 3. Indicateurs de surveillance et mesure en mode global	29
3.1. Introduction.	29
3.2. Classement « VIS » des machines	29
3.2.1. Machines vitales.	29
3.2.2. Machines importantes	30
3.2.3. Machines secondaires	30
3.2.4. Cinématique	30
3.3. Types de surveillance	30
3.3.1. Système de surveillance vibratoire intelligent	31
3.4. Les paramètres de surveillance	32
3.5. Niveau global et analyse de tendance	33
3.5.1. Niveaux globaux	33

3.5.1.1. Niveau global d'accélération : [2-20 000 Hz]	33
3.5.1.2. Niveau global de vitesse : [10-1 000 Hz]	33
3.5.1.3. Niveau global de déplacement : [3-300 Hz]	33
3.5.2. Les indicateurs basses fréquences	34
3.5.2.1. Déplacement crête-à-crête	34
3.5.2.2. Vitesse efficace V_{eff} entre 10 et 1 000 Hz	34
3.5.3. Les indicateurs hautes fréquences : accélération efficace γ_{eff} entre 1 et 10 KHz.	35
3.5.4. Les indicateurs spécifiques aux roulements.	35
3.5.4.1. Facteur de crête (FC) entre 1 kHz et 20 kHz.	35
3.5.4.2. Facteur K entre 1 kHz et 20 kHz.	35
3.5.4.3. Facteur de défaut de roulement (FD)	37
3.5.4.4. Le Kurtosis (ou coefficient d'aplatissement).	37
3.5.5. Analyse de tendance	38
3.5.6. La définition des seuils.	40
3.5.6.1. La définition des seuils d'alarme et de danger.	40
3.5.6.2. Les normes de surveillance vibratoire.	41
3.6. Suivi en mode global (large bande de fréquences).	41
3.6.1. Définition.	41
3.6.2. Exemple d'application	42
3.6.2.1. Énoncé	42
3.6.2.2. Réponse	42
3.6.3. Suivi en mode global par bandes de fréquences	43
3.6.4. Spectre en pourcentage de bande constant (PBC)	45
3.6.4.1. Largeur de bande	45
3.6.4.2. Niveau de référence, alerte et danger	45
3.7. Conclusion	46

Chapitre 4. Analyse spectrale et outils de diagnostic 47

4.1. Introduction.	47
4.2. La transformée de Fourier et sa représentation spectrale	47
4.2.1. Décomposition en série de Fourier.	47
4.2.2. Calcul numérique des coefficients de Fourier	48
4.2.3. Série de Fourier sous forme exponentielle	49
4.3. Transformation de Fourier ou transformation temps-fréquence	49
4.3.1. Transformation d'un signal périodique	49
4.4. Échantillonnage	51
4.4.1. Phénomène de recouvrement ou repliement	52
4.4.1.1. Le théorème de Shannon	52
4.4.1.2. Le filtre anti-repliement	53
4.4.1.3. Le principe d'incertitude de Heisenberg	54

4.4.2. Filtrage	54
4.4.2.1. Filtre passe-bas	54
4.4.2.2. Filtre passe-haut	55
4.4.2.3. Filtre passe-bande	55
4.4.3. Transformation discrète de Fourier	55
4.4.4. Transformation de Fourier rapide (FFT)	56
4.4.5. Le fenêtrage	56
4.4.6. Les fenêtres de pondération	58
4.4.6.1. La fenêtre rectangulaire	58
4.4.6.2. La fenêtre de Hanning	59
4.4.6.3. La fenêtre de Hamming	60
4.4.6.4. Les caractéristiques des fenêtres de pondération	60
4.5. Les analyseurs de spectres	62
4.5.1. Transformation de signaux particuliers	62
4.5.1.1. Signal modulé en amplitude	62
4.5.1.2. Signal modulé en fréquence	64
4.5.1.3. Chocs périodiques	64
4.6. Le moyennage	65
4.6.1. Le moyennage avant traitement FFT	65
4.6.2. Le moyennage après traitement FFT	65
4.7. Échelle linéaire, échelle logarithmique.	66
4.8. Outils de diagnostic	67
4.8.1. Spectre de résolution constante (RC)	67
4.8.1.1. Définition de l'image : résolution	67
4.8.2. Cepstre	68
4.8.3. L'analyse d'enveloppe : principe de l'analyse d'enveloppe	68
4.8.4. Zoom FFT	69
4.9. Conclusion	69

Chapitre 5. Images vibratoires des principaux défauts 71

5.1. Introduction.	71
5.2. Défaut de balourd ou déséquilibre	71
5.2.1. Définition d'un balourd	71
5.2.2. Origine du balourd	72
5.2.3. Spectre du balourd	72
5.3. Défaut de désalignement	73
5.3.1. Définition du défaut	73
5.3.2. Origine du défaut de désalignement	74
5.3.3. Signature du défaut	74
5.4. Défaut de desserrage ou jeu excessif	75

5.4.1. Définition.	75
5.4.2. Signature du défaut	75
5.4.3. Défaut de paliers lisses.	76
5.5. Défaut de courroie.	77
5.6. Défauts d'engrenages	77
5.6.1. Signature d'un engrenement correct	78
5.6.2. Une dent détériorée sur un pignon	79
5.6.3. Une dent détériorée sur chaque pignon	79
5.6.4. Usure généralisée de la denture.	79
5.7. Défaut de roulements	80
5.7.1. Généralités	80
5.7.2. Fréquences caractéristiques	81
5.7.3. Signature des défauts.	82
5.7.4. Défauts de déversement	83
5.7.5. Indicateurs de surveillance du défaut de roulement.	83
5.8. Défaut de passages d'aubes	83
5.9. Défauts électriques	84
5.10. Conclusion	86

Chapitre 6. Équilibrage des rotors 87

6.1. Introduction.	87
6.2. Rotor équilibré	87
6.3. Balourd : le déséquilibre	87
6.3.1. Définition.	87
6.3.2. Types de balourd	88
6.3.2.1. Balourd statique	89
6.3.2.2. Balourd couple	89
6.3.2.3. Balourd dynamique	89
6.3.3. Calcul de balourd	90
6.4. Pratique de l'équilibrage	90
6.4.1. Procédure d'équilibrage sur un seul plan	91
6.4.2. Lancer à vide et mesure du balourd initial	91
6.4.3. Vibration avec une masse d'essai	91
6.4.4. Calcul de la masse de correction et l'angle de correction	91
6.4.5. Méthode de diagramme vectoriel : représentation des vecteurs mesurés.	92
6.4.6. Calcul de la masse de correction	93
6.4.6.1. Fixation de la masse de correction.	94
6.4.7. Qualité d'équilibrage	94
6.4.8. Choix de la masse d'essai	95

6.5. Équilibrage sur deux plans	95
6.5.1. Formulation	96
6.6. Conclusion	98

Chapitre 7. La thermographie infrarouge 99

7.1. Introduction.	99
7.2. Principe de la méthode	99
7.3. Étude du rayonnement infrarouge.	100
7.3.1. Le spectre électromagnétique	100
7.3.2. Lois théoriques de rayonnement	101
7.3.2.1. Loi de Plank.	101
7.3.2.2. Loi de Wien	102
7.3.2.3. Loi de Stefan-Boltzmann	102
7.3.3. Bilan radiatif.	102
7.3.3.1. Équation de conservation d'énergie	102
7.3.3.2. Bilan radiatif du corps réel	104
7.3.4. L'émissivité	104
7.4. La caméra infrarouge	105
7.4.1. Technologie	105
7.4.2. Énergie rayonnée mesurée par la caméra	105
7.4.3. Récapitulatif des grandeurs d'influence	106
7.5. Application de la thermographie dans la maintenance.	107
7.5.1. Maintenance électrique.	107
7.5.1.1. Effet « joule ».	107
7.5.1.2. Température différentielle et sévérité de défaut	107
7.5.2. Maintenance mécanique	108
7.6. Conclusion	109

Chapitre 8. Émission acoustique 111

8.1. Introduction.	111
8.2. Sons et ultrasons	111
8.3. Mesure des ultrasons	112
8.3.1. L'effet piézoélectrique	112
8.3.2. Le détecteur d'ultrasons	112
8.4. Les ultrasons dans la maintenance	113
8.4.1. Le contrôle des fuites de gaz	113
8.4.2. La détection des fuites	114
8.4.3. Contrôle d'étanchéité.	114
8.4.4. Inspection mécanique	114

8.4.4.1. Friction source d'ultrasons	114
8.4.4.2. Surveillance des roulements	115
8.4.4.3. Surveillance des purgeurs à vapeurs et des vannes	115
8.4.5. Inspection des défauts électriques	116
8.5. Conclusion	116

Chapitre 9. Les huiles industrielles 117

9.1. Introduction.	117
9.2. Les rôles des huiles industrielles	117
9.2.1. La lubrification	117
9.2.1.1. Régime onctueux	118
9.2.1.2. Régime visqueux	118
9.2.1.3. Régime élasto-hydrodynamique	119
9.2.1.4. Régime hydrostatique	119
9.2.2. Le refroidissement	119
9.2.3. Nettoyage et protection	119
9.2.4. Étanchéité	119
9.3. Les différents types des huiles de base	120
9.3.1. Les huiles minérales	120
9.3.2. Les huiles de synthèse	120
9.3.3. Les huiles de semi-synthèse	120
9.4. Les caractéristiques des huiles industrielles	121
9.4.1. Point d'éclair.	121
9.4.2. Point d'éclair de Cleveland	121
9.4.3. Point de feu et d'aniline	121
9.4.4. La viscosité	122
9.4.4.1. Viscosité dynamique.	122
9.4.4.2. Viscosité cinématique	122
9.4.5. L'indice de viscosité (<i>Viscosity Index</i>)	123
9.4.6. L'indice d'acidité (TAN : <i>Total Acid Number</i>)	123
9.4.7. L'indice de basicité totale (TBN).	124
9.4.8. Les additifs.	124
9.5. Classification des huiles industrielles	125
9.5.1. Classification ISO.	125
9.5.2. Classification SAE	125
9.6. Conclusion	126

Chapitre 10. Analyse des huiles industrielles 127

10.1. Introduction	127
10.2. Objectifs de l'analyse des huiles en maintenance.	127

10.3. Préparation d'un échantillon	128
10.4. Analyses des lubrifiants	128
10.5. Mesure de la viscosité dynamique	129
10.5.1. Viscosimètre à bille	129
10.5.1.1. Principe de l'appareil	129
10.5.1.2. Procédure de mesure	129
10.5.2. Mesure empirique de la viscosité cinématique	130
10.5.2.1. Viscosité Engler	130
10.5.2.2. Viscosimètre à chute de billes à double tube	130
10.5.2.3. Viscosimètre à capillaire	131
10.5.3. Détermination de l'indice de viscosité (IV)	132
10.6. Contamination des lubrifiants	132
10.6.1. Spectroscopie d'absorption infrarouge (IR)	133
10.6.2. Centrifugation	133
10.6.3. Spectrométrie d'émission atomique	133
10.6.4. Analyse par filtration gravimétrique	133
10.6.5. Ferrographie	134
10.7. Comptage des particules	134
10.7.1. Microscopie optique	134
10.7.2. Systèmes de comptage automatique par transmission de lumière	134
10.7.3. Normes de propreté	135
10.7.3.1. Norme NAS 1638	135
10.7.3.2. Norme ISO 4406	135
10.8. Conclusion	136
 Annexe 1. Norme ISO 2372	 137
 Annexe 2. Norme CDA-MS-NVSH	 139
 Annexe 3. Norme 1940 pour équilibrage des rotors	 141
 Bibliographie	 143
 Index	 149