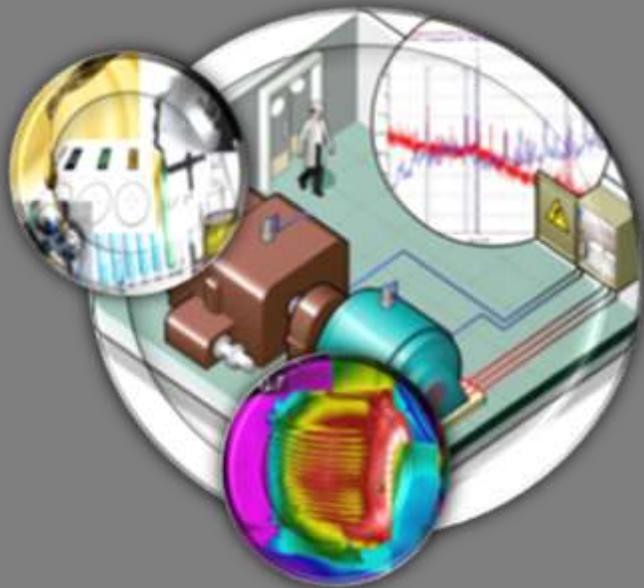


Edition
2015

Techniques de Surveillance des machines tournantes

Analyse vibratoire,
Analyse des huiles industrielles,
Thermographie infrarouge

Licence Appliquée En Génie Mécanique



Mme Mehdiya Ghozlane
Professeure Technologue Génie Mécanique
Edition 2015



Préface

Les industriels sont confrontés généralement à un double défi économique. D'une part, ils doivent augmenter la flexibilité et la productivité par une disponibilité accrue de leur outil de production et d'autre part ils doivent diminuer les coûts d'entretien et de réparation. Pour cela, les industriels ont cherché des méthodes de maintenance efficaces et performantes permettant sans démontage ou arrêt de fabrication, de prévenir la panne. Cette méthode s'appelle la maintenance conditionnelle ; elle est basée essentiellement sur la surveillance de l'état de santé des machines sans être obligé d'arrêter la production.

Le recours à des techniques de surveillance fiables nécessite des investissements en matériel d'acquisition et en ressources humaines habilitées et compétentes dans le domaine.

Cet ouvrage expose les techniques de surveillance les plus fréquentes en maintenance prédictive, et sont présentées en trois parties : l'analyse vibratoire, l'analyse des huiles et la thermographie infrarouge.

La vibration est considérée comme le meilleur paramètre de fonctionnement pour juger les conditions dynamiques telles que déséquilibre, défauts de roulements... Beaucoup de problèmes de machines se montrent comme des vibrations excessives.

Déséquilibre du rotor, désalignement, le relâchement mécanique, la résonance structurelle, défauts de fondation non rigide, et défaut d'engrenage sont quelques défauts qui peuvent être mesurés par analyse vibratoire. La mesure de la vibration "globale" d'une machine, d'un rotor par rapport à une machine ou la structure d'une machine, et la comparaison de la mesure à sa valeur normale (norme) indique l'état de santé actuel de la machine.

L'analyse des huiles industrielles est, une méthode non destructive, rapide pour évaluer la santé d'un moteur ou d'un système hydraulique en

regardant ce qui est dans l'huile. L'analyse de l'huile implique divers tests de laboratoire effectués sur un échantillon d'huile. Les résultats de ces tests donnent des informations sur l'état du lubrifiant, les niveaux de contamination et des taux d'usure des composants lubrifiés à l'huile.

L'analyse thermographique est un outil de maintenance prédictive efficace à utiliser en conjonction avec d'autres types de procédés de « condition monitoring ». Le plus grand avantage de la thermographie est qu'elle est utilisée pour identifier une série de problèmes possibles sur la base de l'état des divers types de machines. Cette partie explique le processus de la thermographie et discute les avantages et les inconvénients de ce type d'analyse. Pour utiliser l'appareil photo thermique et créer des rapports efficaces, on a besoin d'acquérir une compréhension générale de la science derrière la thermographie infrarouge. Cette partie va exposer la terminologie et les compétences nécessaires pour commencer à utiliser une caméra infrarouge.

Cet ouvrage constitue un support pratique pour la mise en place d'une politique de maintenance prévisionnelle basée sur les trois techniques. Ce travail est une modeste contribution à l'enrichissement de la bibliothèque mécanique qui est pourvue d'ouvrages spécialisés en techniques de maintenance prédictive.

L'auteur

Table des matières

PREFACE	I
TABLE DES MATIERES	III
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIV
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITES	XV
ANALYSE VIBRATOIRE.....	XV
ANALYSE DES HUILES INDUSTRIELLES.....	XVI
THERMOGRAPHIE INFRAROUGE	XVII
PARTIE A : ANALYSE VIBRATOIRE.....	1
CHAPITRE 1. SURVEILLANCE ET MAINTENANCE PREDICTIVE	1
A. ENJEUX DE LA MAINTENANCE	1
1. <i>Méthodes de maintenance</i>	1
2. <i>Coût de maintenance</i>	5
B. SURVEILLANCE DES EQUIPEMENTS	6
1. <i>Méthodes de surveillance</i>	7
2. <i>Indicateurs de surveillance</i>	9
3. <i>Notion de seuils</i>	9
C. TECHNIQUES DE SURVEILLANCE.....	10
1. <i>Analyse vibratoire</i>	10
2. <i>Thermographie infrarouge</i>	11
3. <i>Mesure ultrasonore</i>	12
4. <i>Analyse des huiles</i>	13
5. <i>Analyse du bruit</i>	13
CHAPITRE 2. VIBRATION DES MACHINES TOURNANTES.....	15
A. INTRODUCTION A LA VIBRATION.....	15
1. <i>Définitions (norme AFNOR 90.001)</i>	15
2. <i>Grandeurs caractéristiques des vibrations</i>	17
3. <i>Grandeur cinématique</i>	19
4. <i>Nature de vibration</i>	23
B. LES INDICATEURS DES VIBRATIONS.....	30

1.	<i>Indicateurs énergétiques</i>	30
2.	<i>Indicateurs spectraux et typologiques</i>	39
C.	CRITERE DE SEVERITE	44
1.	<i>Les seuils</i>	45
2.	<i>Courbes de tendance</i>	45
CHAPITRE 3. ACQUISITION ET TRAITEMENT DES SIGNAUX.....		47
A.	LES CAPTEURS DE VIBRATION	47
1.	<i>Capteur d'accélération (Accéléromètre)</i>	47
2.	<i>Capteur de vitesse (Vélocimètre)</i>	53
3.	<i>Capteur de déplacement (Proximètre)</i>	53
4.	<i>Points de mesure</i>	56
B.	TRAITEMENT DES SIGNAUX	58
1.	<i>Le conditionnement</i>	58
2.	<i>Echantillonnage (Numérisation)</i>	59
3.	<i>Analyseur de fréquence</i>	62
4.	<i>Fenêtrage</i>	64
5.	<i>Moyennage</i>	66
6.	<i>Filtrage</i>	67
CHAPITRE 4. SIGNATURES VIBRATOIRES DES DEFAUTS MECANIQUES		69
A.	BALOURD.....	69
1.	<i>Introduction</i>	69
2.	<i>Origine de balourd</i>	70
3.	<i>Types de balourd</i>	71
4.	<i>Réponse temporelle et spectrale</i>	72
B.	DEFAUTS DE FIXATION	74
C.	JEU DE PALIER	75
D.	DEFAUT D'ALIGNEMENT	78
1.	<i>Désalignement Parallèle</i>	78
2.	<i>Désalignement Angulaire</i>	80
3.	<i>Désalignement combiné</i>	82
E.	DEFAUT DE COURROIE	82
1.	<i>Courroie en mauvais état</i>	83
2.	<i>Alignement ou tension</i>	84
F.	DEFAUT D'ENGRENAGE	85

1.	<i>Types d'engrenages</i>	85
2.	<i>Raideur d'engrènement</i>	86
3.	<i>Vibration des engrenages en bon état</i>	88
4.	<i>Dentures détériorées</i>	90
5.	<i>Une seule dent détériorée</i>	92
6.	<i>Une denture détériorée dans chaque roue</i>	93
G.	DETERIORATION DES ROUEMENTS.....	95
1.	<i>Cinématique des roulements</i>	97
2.	<i>Défaut de cage (rupture)</i>	99
3.	<i>Défaut de billes ou de rouleaux</i>	100
4.	<i>Défauts des bagues internes et externes</i>	103
EXERCICES AVEC CORRECTIONS		105
BIBLIOGRAPHIE		111
PARTIE B : ANALYSE DES HUILES INDUSTRIELLES		112
CHAPITRE 5. LES HUILES INDUSTRIELLES		114
A.	INTRODUCTION	114
B.	CARACTERISTIQUES	114
C.	COMPOSITION DES HUILES	115
1.	<i>Les huiles de base</i>	115
2.	<i>Les additifs</i>	116
D.	CLASSIFICATION DES HUILES	120
1.	<i>Huile hydraulique Norme ISO-NF</i>	120
2.	<i>Huiles moteurs et boîtes de vitesses Normes SAE</i>	121
3.	<i>Huiles moteurs et transmission Normes API</i>	122
CHAPITRE 6. CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE		125
A.	LA VISCOSITE.....	125
1.	<i>La viscosité dynamique</i>	126
2.	<i>La viscosité cinématique</i>	126
3.	<i>Indice de viscosité (IV)</i>	127
B.	LE POINT D'ECLAIR ET DE CONGELATION.....	128
C.	CONDUCTIVITE ELECTRIQUE	129
D.	MESURE DE LA VISCOSITE	130
1.	<i>Viscosimètre capillaire</i>	130

2.	<i>Viscosimètre à coupe</i>	131
1.	<i>Rhéomètre</i>	131
2.	<i>Viscosimètre à chute de bille</i>	133
3.	<i>Viscosimètre à billes</i>	133
CHAPITRE 7.	DEGRADATION DES HUILES	135
A.	INTRODUCTION.....	135
B.	DEGRADATION DES HUILES.....	135
1.	<i>TAN (indice d'acide)</i>	135
2.	<i>Oxydation</i>	136
3.	<i>Variation de la viscosité avec la température</i>	138
4.	<i>Pouvoir détergeant</i>	139
C.	CONTAMINATION DES LUBRIFIANTS.....	140
1.	<i>Contamination par des particules solides</i>	140
2.	<i>Contamination par l'humidité (Teneur en eau)</i>	140
D.	EFFET DE LA CONTAMINATION.....	141
1.	<i>Usure par abrasion</i>	141
2.	<i>Usure par fatigue</i>	141
3.	<i>Usure par érosion</i>	142
4.	<i>Usure par adhérence</i>	142
CHAPITRE 8.	METHODES D'ANALYSE	144
A.	TACHE SUR BUVARD.....	144
B.	LE COMPTAGE DE PARTICULES.....	144
1.	<i>Définition de la taille des particules</i>	144
2.	<i>Comptage optique</i>	145
3.	<i>Comptage automatique</i>	146
A.	L'ANALYSE GRAVIMETRIQUE.....	150
C.	LA FERROGRAPHIE.....	151
D.	LA SPECTROMETRIE D'EMISSION.....	152
CHAPITRE 9.	PROCEDES DE CONTROLE	154
A.	PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS.....	154
B.	MOYENS DE PRELEVEMENT.....	155
1.	<i>Avec la vanne d'échantillonnage</i>	155
2.	<i>Avec la seringue</i>	155
3.	<i>Avec pompe d'aspiration</i>	156

C.	METHODES DE PRELEVEMENTS	156
D.	SECURITE ET CONDITION D'UTILISATION.....	160
E.	EVALUATION DE LA POLLUTION	161
1.	<i>Quantification des contaminants</i>	161
2.	<i>Types de polluant</i>	163
	BIBLIOGRAPHIE.....	164
	PARTIE C : THERMOGRAPHIE INFRAROUGE	165
	CHAPITRE 10. BASE THEORIQUE DE LA THERMOGRAPHIE	166
A.	HISTORIQUE	166
B.	RADIATION ELECTROMAGNETIQUE	167
1.	<i>Classification</i>	167
2.	<i>Radiation infrarouge</i>	169
C.	LOI DE RADIATION.....	172
1.	<i>Corps noir</i>	172
2.	<i>Loi de Planck.....</i>	173
3.	<i>Loi de Stefan-Boltzmann</i>	174
4.	<i>Loi de déplacement de Wien</i>	174
5.	<i>Emissivité.....</i>	175
D.	TRANSFERT DE CHALEUR.....	176
1.	<i>Conduction</i>	176
2.	<i>Convection.....</i>	177
3.	<i>Rayonnement</i>	178
	CHAPITRE 11. IMAGERIE THERMIQUE.....	181
A.	INTRODUCTION	181
1.	<i>Processus.....</i>	181
2.	<i>Avantages et inconvénients</i>	182
B.	INSTRUMENT DE THERMOGRAPHIE	182
1.	<i>Caméra thermique</i>	182
2.	<i>Pointeur thermique</i>	190
	CHAPITRE 12. APPLICATIONS INDUSTRIELLES	193
A.	INTRODUCTION	193
B.	SYSTEMES ELECTRIQUES	193
1.	<i>Installation à haute tension.....</i>	193

2. <i>Installation à basse tension</i>	194
C. INSTALLATIONS MECANIQUES	195
D. TUYAUTERIE	196
E. AUTRES APPLICATIONS	197
F. DEMARCHE D'INSPECTIONS THERMIQUES	198
1. <i>Définir la tâche</i>	198
2. <i>Prise d'image thermique (Camera)</i>	198
3. <i>Analyse et rédaction du rapport</i>	199
EVALUATION : QCM	202
TESTEZ VOS CONNAISSANCES	207
BIBLIOGRAPHIE	208
ANNEXE PARTIE A	210
ANNEXE PARTIE B	213
ANNEXE PARTIE C	219

Liste des figures

Figure 1-1 : Courbe en baignoire	2
Figure 1-2 : Méthodes de maintenance	3
Figure 1-3 : Surveillance de la dégradation [2].....	4
Figure 1-4 : Optimisation de la politique de maintenance [1]	5
Figure 1-5 : Surveillance offline	7
Figure 1-6 : Surveillance on-line [13].....	8
Figure 1-7 : Sources de vibration.....	11
Figure 1-8 : Défaut sur un palier [2]	12
Figure 2-1 : Systèmes oscillants.....	16
Figure 2-2 : Oscillation harmonique	16
Figure 2-3 : Amplitude d'une vibration harmonique.....	18
Figure 2-4 : Amplitude d'une vibration non harmonique.....	18
Figure 2-5 : Déphasage entre deux signaux harmoniques	19
Figure 2-6 : Grandeurs associés à un signal vibratoire	23
Figure 2-7 : Signal sinusoïdal simple.....	24
Figure 2-8 : Exemple 1 Fonction sinusoïdale complexe	24
Figure 2-9 : Exemple 2 Somme de deux fonctions sinusoïdales simples	25
Figure 2-10 : Modulation de fréquence.....	26
Figure 2-11 : Modulation de phase	27
Figure 2-12 : Modulation d'amplitude (battement).....	28
Figure 2-13 : Signaux impulsionnels	29
Figure 2-14 : Signaux impulsionnels complexes	29
Figure 2-15 : (a) Signal harmonique simple ; (b) Signal avec bruit blanc	30
Figure 2-16 : Classification des indicateurs de surveillance	31
Figure 2-17 : Chaîne de mesure du niveau global	32
Figure 2-18 : Evolution des amplitudes efficace et de crête [5].....	34
Figure 2-19 : Evolution du facteur de crête d'un roulement [5]	35
Figure 2-20 : Fréquences normalisées en octaves et tiers d'octaves [8]	38
Figure 2-21 : Exemple de spectre en 1 octave et 1/3 octave	38

Figure 2-22 : Vibration harmonique	41
Figure 2-23 : Vibration Non Harmonique	41
Figure 2-24 : Modulation d'Amplitude	42
Figure 2-25 : Modulation de Fréquence	43
Figure 2-26 : Courbe de tendance	46
Figure 3-1 : Principe de l'effet piézoélectrique	49
Figure 3-2 : Structure d'un accéléromètre à compression [14]	49
Figure 3-3 : Gamme de fréquence $f_1 - f_0$	50
Figure 3-4 : Sensibilité vs. Bande passante [6]	51
Figure 3-5 : Montage des capteurs vs gamme de fréquence utile (1) [14] ..	52
Figure 3-6 : Montage des capteurs vs gamme de fréquence (2) [14]	52
Figure 3-7 : Structure d'un vélocimètre [14]	53
Figure 3-8 : Principe d'un Capteur à courant de Foucault.....	54
Figure 3-9: Structure d'un capteur de proximité.....	55
Figure 3-10 : Mesure statique (GAP) et dynamique (Vibration)	55
Figure 3-11 : Fixation des capteurs de proximité	56
Figure 3-12 : Exemple de points de mesure	57
Figure 3-13 : Point de mesure pratique pour un moteur et une pompe	57
Figure 3-14: Principe de l'échantillonnage	60
Figure 3-15: Phénomène de recouvrement lié à l'échantillonnage	61
Figure 3-16: Filtre anti-repliement	62
Figure 3-17 : Analyse en fréquence [6].....	62
Figure 3-18: Echelle d'amplitude Linéaire vs Logarithmique	64
Figure 3-19 : Echelle fréquentielle linéaire vs logarithmique.....	64
Figure 3-20: Périodisation artificielle [9]	65
Figure 3-21 : Différentes formes de fenêtrage.....	66
Figure 3-22 : Moyennage (a) Linéaire (b) exponentiel	67
Figure 3-23: Classification des filtres.....	68
Figure 4-1 : Défaut de balourd dans un rotor.....	69
Figure 4-2 : Force centrifuge exercée par la masse.....	70
Figure 4-3 : Balourd statique	71
Figure 4-4 : Balourd de couple	71

Figure 4-5 : Balourd quasi-statique	72
Figure 4-6 : Action sur les paliers par la Force centrifuge d'un balourd	72
Figure 4-7 : Signature d'un défaut de balourd	73
Figure 4-8 : Mise en évidence d'un défaut de balourd [5]	73
Figure 4-9 : Défaut de fixation	74
Figure 4-10 : Signature d'un défaut de fixation.....	74
Figure 4-11 : Mise en évidence d'un défaut de fixation [5]	75
Figure 4-12 : Phénomène de tourbillonnement.....	76
Figure 4-13 : Signature vibratoire d'un jeu de palier.....	77
Figure 4-14 : Désalignement parallèle.....	78
Figure 4-15 : Comportement des paliers pour un désalignement parallèle	79
Figure 4-16 : Signal temporel Spectre d'un défaut d'alignement parallèle .	80
Figure 4-17 : Désalignement angulaire.....	80
Figure 4-18 : Flexion pure des paliers.....	81
Figure 4-19 : Spectre typique d'un défaut d'alignement angulaire.....	81
Figure 4-20 : Désalignement combiné.....	82
Figure 4-21 : Transmission par courroie.....	82
Figure 4-22 : Défaut de courroie	83
Figure 4-23 : Signature d'un défaut de courroie	84
Figure 4-24 : Différents types d'engrenages	86
Figure 4-25 : Ligne d'action de deux roues	86
Figure 4-26 : Dents en prise lors de l'engrènement [16].....	87
Figure 4-27 : Raideur d'engrènement [16].....	87
Figure 4-28 : Spectre d'un engrenage sans défaut.....	89
Figure 4-29 : Train épicycloïdal.....	89
Figure 4-30 : Défaut localisé [12].....	91
Figure 4-31 : Défaut distribué [12]	91
Figure 4-32 : Signature vibratoire d'un défaut d'engrènement	92
Figure 4-33 : Modulation d'amplitude due à un défaut sur une dent	93
Figure 4-34 : Signature d'une dent détériorée sur la roue 2.....	93
Figure 4-35 : Spectre d'un engrenage avec le cepstre correspondant.....	95
Figure 4-36: Constitution des roulements.....	95
Figure 4-37: Source de vibration dans les roulements.....	96

Figure 4-38 : Paramètres géométriques des roulements.....	98
Figure 4-39 : Paramètres cinématiques du roulement	99
Figure 4-40 : Paramètres caractéristiques des roulements	100
Figure 4-41 : Rotation des éléments roulants	101
Figure 4-42: Spectre typique d'un défaut de bille.....	103
Figure 4-43 : Signal temporel et spectral d'un défaut de roulement.....	104
Figure 5-1 : Désignation des huiles mono grade SAE	121
Figure 5-2 : Désignation des huiles multigrade SAE	121
Figure 6-1 : Détermination de théorique de la viscosité	125
Figure 6-2 : Modélisation du comportement des fluides [6].....	126
Figure 6-3 : Comparaison de l'IV des huiles mono grade et multigrade	127
Figure 6-4 : Détermination de l'IV	128
Figure 6-5 : Conductivité électrique vs Température [1]	130
Figure 6-6 : Viscosimètre capillaire [3]	131
Figure 6-7 : Viscosimètre à coupe	132
Figure 6-8 : Rhéomètre.....	133
Figure 6-9 : Viscosimètre à bille	134
Figure 7-1 : Evolution du (Total Acid Number).....	136
Figure 7-2 : Degré d'oxydation en fonction de la température	137
Figure 7-3 : Principe de Fourier Transform Infrared Spectroscopy [6].....	137
Figure 7-4 : Un spectre infrarouge typique	138
Figure 7-5 : Viscosité vs Température	139
Figure 7-6 : Usure des composants par abrasion	141
Figure 7-7 : Usure des organes mécanique par fatigue.....	142
Figure 7-8 : Dégradation par érosion	142
Figure 7-9 : Usure par adhérence.....	143
Figure 8-1 : Détection de la contamination sur papier buvard	144
Figure 8-2 : Définition de la taille des particules	145
Figure 8-3 : Comptage optique.....	146
Figure 8-4 : Occultation de la lumière [4].....	147
Figure 8-5 : Diffusion de lumière [4].....	148
Figure 8-6 : Obstruction du débit	148
Figure 8-7 : Variation du débit, et de la pression vs temps [5]	149

Figure 8-8 : Imagerie numérique	149
Figure 8-9 : Signal de réception [2]	150
Figure 8-10 : Analyse par gravimétrie	150
Figure 8-11 : Exemple de membrane filtré par gravimétrie.....	151
Figure 8-12 : Principe de la ferrographie.....	152
Figure 8-13 : Spectromètre à émission.....	153
Figure 9-1 : Pompe Vampire.....	156
Figure 9-2 : Prélèvement dynamique en ligne	158
Figure 9-3 : Prélèvement statique dans le réservoir	160
Figure 10-1 : Onde électromagnétique	169
Figure 10-2 : Dispersion de la lumière par un prisme	169
Figure 10-3 : Courbes de Planck	173
Figure 10-4 : Transfert de chaleur par conduction.....	176
Figure 10-5 : Transfert thermique par convection	177
Figure 10-6 : Flux de chaleur radiatif.....	178
Figure 10-7 : Rayonnement incident sur une surface	179
Figure 11-1 : Processus d'analyse thermographique	181
Figure 11-2 : Caméras thermographique (FLIR)	183
Figure 11-3 : Conversion du rayonnement infrarouge en lumière visible .	183
Figure 11-4 : Principe de fonctionnement d'une caméra infrarouge.....	184
Figure 11-5 : Résolution spatiale	186
Figure 11-6 : Image thermique: 640 x 480 pixels, 320 x 240 pixels.....	186
Figure 11-7 : FOV Horizontal et Vertical.....	189
Figure 11-8 : Surface minimale détectable.....	189
Figure 11-9 : Phénomène de saturation.....	190
Figure 11-10 : Principe de mesure de température	191
Figure 11-11 : Structure générale d'un thermomètre infrarouge	192
Figure 11-12 : Thermomètre infrarouge portable [2]	192
Figure 12-1 : Défaut détecté dans une installation haute tension [10]	194
Figure 12-2 : Charge non répartie dans les boîtes à fusibles.....	195
Figure 12-3 : Problème d'enroulement interne dans un moteur	195
Figure 12-4 : Niveau des liquides dans les réservoirs de stockage.....	197

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Variation des amplitudes en fonction de la fréquence	22
Tableau 2-2: Unités de mesure des vibrations	22
Tableau 3-1 : Caractéristiques usuelles des accéléromètres	51
Tableau 3-2 : Exemple des caractéristiques des capteurs de déplacement.	56
Tableau 3-3 : Caractéristiques des fenêtres temporelles.....	66
Tableau 5-1 : Additifs et leurs fonctions.....	119
Tableau 5-2: Grade selon ISO NF.....	120
Tableau 9-1 : Résultat de contamination d'une pompe hydraulique	161
Tableau 10-1 : Types d'infrarouges	172
Tableau A-1 : Amplitude des vibrations selon ISO 10816	210
Tableau A-2 : Usage général selon la puissance et la suspension ISO 2372	210
Tableau A-3 Schéma d'appréciation de la sévérité	211
Tableau A-4 : Critère de sévérité en accélération	212
Tableau A-5 : Amplitude des vibrations en dB [14].....	212
Tableau B-1: Grade de viscosité (Norme ISO-NF).....	213
Tableau B-2 : Valeur de L et H pour le calcul de l'IV.....	214
Tableau B-3 : Classe de propreté typique selon ISO 4406 : 1999.....	215
Tableau B-4 : Conductivité des fluides et huiles synthétiques à 23 ° C.....	216
Tableau B-5 : Principales normes associées à la filtration et au contrôle de pollution	217
Tableau B-6 : Code de pollution ISO 4406.....	218
Tableau C-1 : Températures de fonctionnement admissibles des différents lubrifiants pour roulements [www.skf.com]	219
Tableau C-2 : Température maximale d'exploitation des polymères [www.goodfellow.com]	220
Tableau C-3 : Émissivité de divers matériaux.....	223

Liste des symboles et des unités

Analyse Vibratoire

Symbole	Désignation	Unité
t	Variable temporelle	s
T	Période de temps	s
f	Fréquence	Hz
N	Vitesse de rotation	tr/min
RPM	Rotation par minute	
CPM	Cycle par minute	
Ω	Vitesse angulaire	rad/s
A	Amplitude maximale	
A_c	Amplitude de crête	
A_{cc}	Amplitude Crête à crête	
A_{eff}	Amplitude efficace	
$X(t)$	Déplacement instantané	mm
$V(t)$	Vitesse instantanée	mm/s
$A(t), \gamma(t)$	Accélération instantané	mm/s ²
m	Facteur de modulation	sans
δ	Indice de modulation	sans
β	Angle de contact	rad
$\Delta\Phi$	Excursion en phase	sans
PWR	Power	W
FC	Facteur de crête	sans
B	Flux magnétique	Tesla
FFT	Fast Fourier Transformer	
DFT	Discrète Fourier Transformer	
CAN	Convertisseur Analogique Num.	
F	Force	N
D	Diamètre	mm

R	Rayon	mm
L	Longueur	mm
E	Entraxe	mm
Z	Nombre de dent, éléments roulants	
n	Nombre entier	
g	Accélération de pesanteur	m/s ²
K	Raideur	N/mm
M	Masse	Kg
ε	Rapport de conduite	sans
β	Angle de contact	Rad
PPCM	Plus Petit Commun Multiple	

Analyse des huiles industrielles

Symbole	Désignation	Unité
ρ	Masse volumique	Kg.m ⁻³
ν	Viscosité cinématique	cSt (mm ² s ⁻¹)
μ	Viscosité dynamique	Pa.s
τ	Contrainte de cisaillement	N.mm ⁻²
γ	Déformation de cisaillement	sans
$\dot{\gamma}$	Vitesse de cisaillement	s ⁻¹
u	Déplacement	mm
T	Température	°C, F
Q	Débit	m ³ s ⁻¹
L	Longueur	m
a	Rayon tube capillaire	m
t	Temps	s
Ω	Vitesse de rotation	tr.min ⁻¹
M	Couple	N.m
g	Accélération de pesanteur	m.s ⁻²
σ	Conductivité électrique	pS.m ⁻¹
TAN	Total Acid Number	
FTIR	Fourier Transformer Infrared	

	Spectroscopy
IV (VI)	Indice de viscosité
ACTFD	Air Cleaner Fine Test Dust
MTD	Medium Test Dust
APC	Automatic Particle Counter

Thermographie infrarouge

Symbole	Désignation	Unité
W	Energie électromagnétique rayonnée par un corps noir	$W.m^{-2}.\mu m^{-1}$
C	Vitesse de la lumière $3,10^8$ m/s	ms^{-1}
h	Constante de Planck $6,6 .10^{-34}$ J.s	J.s
k	Constante de Boltzmann $1,4 .10^{-23}$ J.K ⁻¹	J.K ⁻¹
T	Température absolue	K ou °C
λ	Longueur d'onde μm	μm
σ	Constante de Stefan-Boltzmann $5,67 .10^{-8}$	$W/(m^2.K^4)$
ε	Emissivité	Sans
ρ	Réfectivité	Sans
α	Absorptivité	Sans
τ	Transmissivité	Sans
IR	InfraRed	
FOV	Field Of View	

Partie A : Analyse Vibratoire

La surveillance par analyse vibratoire fait appel à plusieurs disciplines mathématiques, traitement de signal, et informatique.

Cette partie qui contient quatre chapitres a été consacrée pour la mise en situation de la maintenance prédictive, sa position par rapport à d'autres formes de maintenance ainsi qu'à sa contribution à la réduction des coûts de maintenance. Une présentation générale des techniques de surveillance pratiquées dans la maintenance prédictive, les conditions de choix des méthodes et des indicateurs de surveillance.

Le deuxième chapitre est une introduction aux vibrations mécaniques, nature et paramètres caractéristiques. Elle traite aussi les indicateurs utilisés pour la surveillance et le diagnostic des machines avec indication des seuils d'admissibilités.

Le troisième Chapitre porte sur le matériel d'acquisition, ses caractéristiques techniques et les outils d'analyse et de traitement des signaux.

Le quatrième chapitre présente les signatures vibratoires, de la majorité des défauts mécaniques, permettant de faire le diagnostic des machines.

Chapitre 1. Surveillance et Maintenance prédictive

A. Enjeux de la maintenance

Dans des conditions normales, le fonctionnement d'une installation entraîne un vieillissement plus ou moins accentués du matériel, et parfois même des incidents ou accidents. Pour en assurer une exploitation correcte, il est nécessaire de maintenir cette installation en bon état.

En fait le comportement d'une installation en service pendant son cycle de vie est représenté par une courbe en baignoire qui se divise en trois périodes distinctes (Figure 1-1):

- Une période de rodage : pendant cette période l'installation est en garantie, et le taux de défaillance est décroissant. La probabilité de défaillance est élevée vue les défaillances précoces dues aux défauts de conception, de fabrication, de montage ou de mise en place. Aucune intervention n'est préconisée durant cette période.
- Une période de maturité : c'est la période de vie utile, la défaillance dans ce cas est accidentelle. Une politique de maintenance corrective est souhaitable.
- Une période de vieillissement : l'usure des composants devient remarquable et la probabilité de défaillance augmente sous l'effet du vieillissement. Le suivi des dégradations devient de plus en plus nécessaire.

1. Méthodes de maintenance

«La maintenance est l'ensemble des actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise » (norme NF EN 13306).

Trois méthodes principales de maintenance sont utilisées dans l'industrie (Figure 1-2).

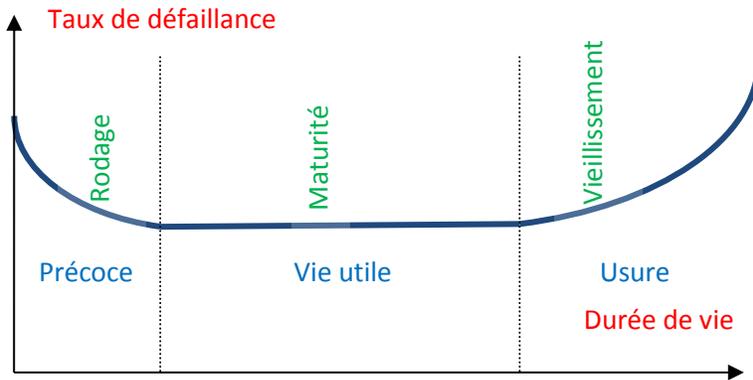


Figure 1-1 : Courbe en baignoire

a) Maintenance corrective

Elle consiste à laisser tourner la machine jusqu'à la défaillance totale, puis effectuer les réparations nécessaires. Ce type de stratégie peut entraîner des pertes de production et des frais de réparations plus importants. De plus, une réparation non planifiée entraînera des coûts élevés.

b) Maintenance préventive systématique

Comme la maintenance corrective entraîne des surcoûts non négligeables, les industriels ont été amenés à remplacer les éléments de machines après un temps de fonctionnement déterminé, c'est la maintenance systématique. C'est une forme de maintenance préventive qui est effectuée selon un calendrier prédéterminé en fonction du temps ou du nombre d'unités d'usage tel que le nombre d'heures de fonctionnement. Ce type de maintenance n'évite pas la panne et en plus coûte cher, puisque les organes montrant un début d'usure sont jetés alors qu'ils peuvent encore rendre service. De plus, les machines qui sont souvent démontées, sont moins fiables du fait des erreurs humaines lors du remontage. Cette maintenance montre son intérêt par rapport à la maintenance corrective

mais reste d'un coût très élevé quant au stock de pièces de rechange qu'il est nécessaire de gérer.

Cette méthode de maintenance comporte des inconvénients à savoir :

- Des éléments de machines seront remplacés alors qu'ils n'ont pas atteint leur durée de vie optimale.
- Certaines pièces de machines peuvent casser de manière précoce suite à un mauvais montage ou à des défauts de fabrication. Donc, le risque de panne reste présent.

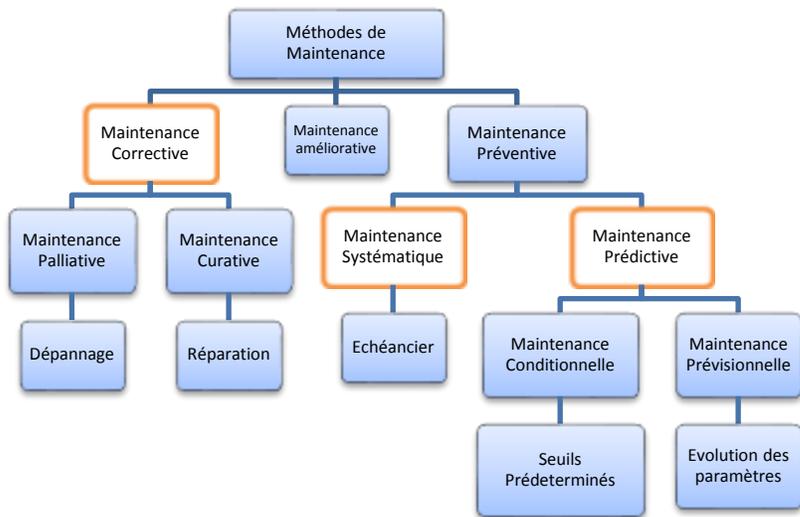


Figure 1-2 : Méthodes de maintenance

c) *La maintenance prédictive*

C'est une autre forme de maintenance préventive. Elle optimise les actions d'intervention et de réparation en se basant sur l'analyse de l'évolution dans le temps de paramètres pertinents. Les industriels se dirigent vers la maintenance prédictive, qui est basée sur l'état réel de la machine.

Elle comporte trois phases:

- **La détection du défaut qui se développe:** A la mise en route de la machine ou après une réparation, différents paramètres (température, performances, vibrations...) caractérisant son fonctionnement sont enregistrés. Ces enregistrements serviront de référence pour suivre par comparaison à intervalles réguliers ou en continu l'évolution de ces paramètres.
- **L'établissement d'un diagnostic:** Dès qu'un défaut est constaté par changement d'un état d'un des paramètres de suivi, il est nécessaire d'établir un diagnostic pour connaître la gravité du défaut. L'établissement du diagnostic est nécessaire avant la programmation de la réparation.
- **L'analyse de la tendance:** L'analyse de tendance permettra d'estimer le temps restant avant une panne et de pouvoir prévoir la réparation. Généralement, quand un défaut est constaté, la surveillance du ou des paramètres est renforcée.

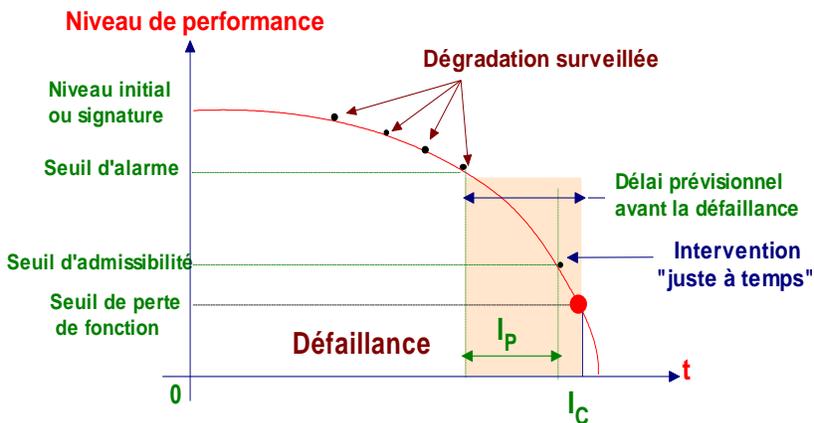


Figure 1-3 : Surveillance de la dégradation [2]

L'état de santé d'une machine peut être évalué par toute analyse permettant de quantifier la dégradation des organes de la machine :

- l'analyse d'huile pour détecter les éléments d'usure...

- l'analyse de courant pour localiser les barres rotatives cassées sur un moteur...
- la thermographie pour la détection de fuite thermique, de mauvais serrage...
- l'analyse vibratoire pour la détection de défauts mécaniques...

2. Coût de maintenance

La maintenance des installations industrielles est essentielle à leur sûreté de fonctionnement ainsi qu'à la sécurité des personnes. Compte tenu de son coût, il est cependant judicieux d'établir un bon équilibre entre maintenance préventif systématique et maintenance correctif.

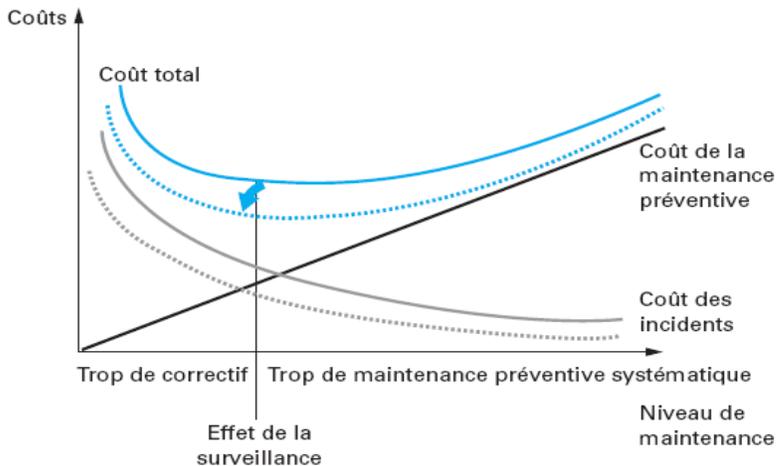


Figure 1-4 : Optimisation de la politique de maintenance [1]

Etant dans le cadre de la politique de maintenance, le choix adéquat des différentes méthodes se décide au niveau de la direction du service maintenance. Les enjeux d'une maintenance efficace sont de répartir les ressources disponibles vers des tâches ou des activités qui ont des retombées directes sur la rentabilité de l'entreprise. En règle générale, on tend vers une diminution des actions de maintenance corrective au profit d'actions préventives. Cette politique doit bien sûr être comprise et

acceptée par le service de production en particulier lorsque la fonction production travaille en feu continu.

Dire que l'on ne va faire que du préventif est loin de la réalité car le risque « zéro » n'existe pas. On ne peut pas tout prévoir! Cela signifie que correctif et préventif vont être complémentaires, et que la part de préventif que l'on va adopter peut se déterminer à partir de considérations économiques (Figure 1-4) mais aussi de moyens humains.

B. Surveillance des équipements

La surveillance des matériels permet de diminuer le niveau de maintenance systématique sans prendre de risque supplémentaire car on continue à s'assurer que le matériel ne présente pas d'anomalie. On peut donc diminuer les coûts, si toutefois le coût du matériel de surveillance reste limité.

Elle s'intègre dans la politique de maintenance prédictive et doit assurer :

- **la prévention** des risques majeurs (arrêt des machines) lorsque les conditions de sécurité (pour l'homme ou pour la machine) ne sont pas satisfaites ;
- **la détection** précoce des anomalies, pour éviter au maximum les avaries en remplaçant les composants défectueux si possible avant incident et au meilleur moment ;
- **l'analyse après incident**, pour remédier aux défauts constatés, et éviter de les retrouver à l'avenir, ou définir les modifications nécessaires.

Le niveau de performance initial, quel que soit le paramètre surveillé, s'appelle aussi « **signature** » de l'équipement : c'est la référence de bon fonctionnement de celui-ci pour le point sensible surveillé. Les mesures peuvent être :

- visuelles (examen de l'usure par la mesure d'une cote, observation d'un jeu mécanique, d'une courroie détendue, etc..),

- réalisées à partir d'appareils de mesures (voltmètre, oscilloscope, analyseur de spectre, radiographie, comptage de particules, etc..),
- visualisables grâce à des capteurs préérégés (témoin de plaquette de frein sur une voiture, témoin de température, etc..).

1. Méthodes de surveillance

a) La surveillance périodique

Le suivi périodique (offline) de l'évolution des paramètres, (vibration, analyse de lubrifiant, etc.), permet de détecter l'apparition de défauts à évolutions lente. La périodicité des prélèvements des indicateurs est variable, elle varie entre 2 semaines et 6 mois suivant la vitalité et le coût des machines en cause. La fréquence peut être accélérée si les symptômes précoces le justifient.

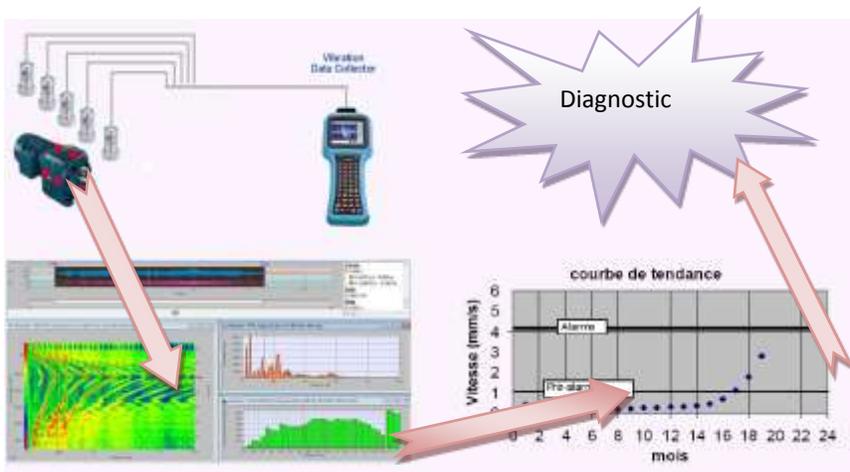


Figure 1-5 : Surveillance offline

b) La surveillance continue

Le suivi continu (on-line), comme le précédent, permet de suivre l'évolution de l'ensemble des paramètres; il présente, en plus, l'avantage de détecter des défauts à évolution rapide et d'assurer la sécurité des installations par déclenchement de la machine à l'approche d'un seuil réputé dangereux.

Les capteurs délivrent de manière continue une information, donc dans ce cas l'intervalle de temps d'acquisition tend vers zéro. A la limite, on est capable de suivre sur écran ou sur traceur la loi de dégradation du matériel. La surveillance continue permet donc de suivre des défauts à évolution rapide. L'intervention préventive est alors signalée par une alarme. Cette alarme peut interrompre l'équipement si nécessaire (pour cause de sécurité par exemple). C'est certainement la forme la plus moderne de la maintenance. On y retrouve bien sûr, l'aspect maintenance conditionnelle et aussi la notion de surveillance auxquels on va associer le pouvoir de décision et d'ordonnancement.

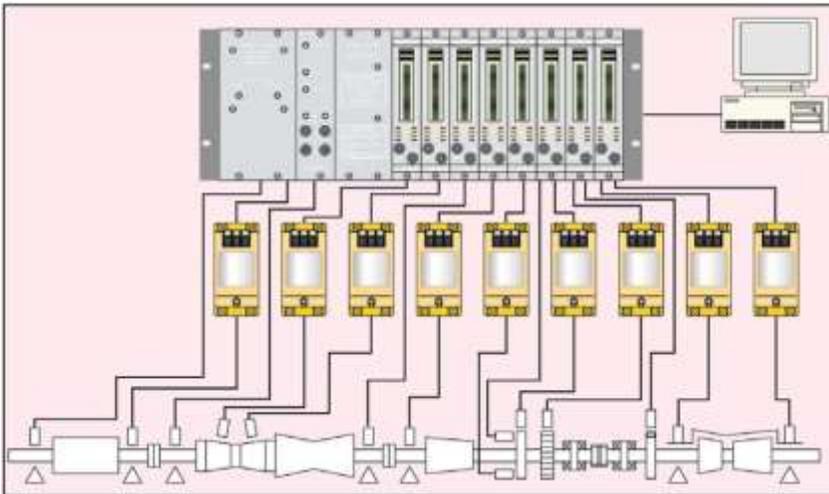


Figure 1-6 : Surveillance on-line [13]

Les défaillances de type explosif qui se manifeste soudain (perte brutale d'aubages de turbine, éclatement d'un flexible) ne sont pas détectables de manière précoce.

2. Indicateurs de surveillance

Les indicateurs de surveillance sont des quantificateurs plus ou moins élaborés, issus d'une grandeur physique. Leurs acquisitions sont souvent possibles en fonctionnement. Ils doivent caractériser un ou plusieurs aspects de l'état de l'équipement ou de sa performance.

Leurs évolutions ou transformations dans le temps doivent être significatives de l'apparition ou de l'aggravation d'une dégradation ou d'un dysfonctionnement tel que :

- La température d'un palier.
- Le taux de concentration dans le lubrifiant de particules métalliques.
- Le bruit et les vibrations générées par son fonctionnement.
- Le rendement mécanique ou thermodynamique d'une machine.
- L'amplitude de variation de vitesse de rotation instantanée.
- Le taux de rebuts de fabrication...

3. Notion de seuils

A chaque indicateur est associé un seuil dont la valeur dépend :

- De la nature des défauts associés
- Du type de la machine surveillée
- Des conditions de fonctionnement

Tant que la valeur d'un indicateur n'excède pas une valeur prédéfinie ou un seuil, l'installation est considérée en bon état. Aucune investigation complémentaire, arrêt pour inspection ou intervention corrective n'est à envisager. Le choix de la valeur du seuil est donc un acte fondamental [3] :

- Une valeur trop basse entraîne des alarmes non justifiées ;

- Une valeur trop élevée rend la détection précoce d'un défaut impossible et une panne peut se produire sans la moindre alarme préalable.

Les systèmes de surveillance offrent souvent au moins deux seuils :

- Le seuil d'alarme dont le dépassement doit déclencher une procédure de diagnostic afin de localiser, voire déterminer l'origine exacte de l'anomalie.
- Le seuil de danger dont le dépassement nécessite un diagnostic immédiat et souvent l'arrêt immédiat de l'installation, il s'agit alors d'une action de mise en sécurité de l'installation.

C. Techniques de surveillance

1. Analyse vibratoire

L'analyse vibratoire permettra de mettre en évidence un grand nombre de problèmes entraînant une diminution de la durée de vie des éléments de la machine. Les défauts détectés par analyse vibratoire sont :

- résonance de structure,
- jeu de palier,
- balourd ou déséquilibre de masse,
- mauvaise fixation,
- défauts de roulements,
- distorsion ou tension trop élevée des courroies,
- mauvais alignement d'une ligne d'arbre,
- défauts d'engrenage....

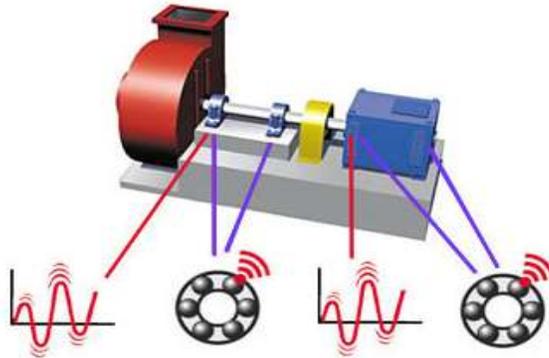


Figure 1-7 : Sources de vibration

2. Thermographie infrarouge

On peut procéder à la mesure de la température grâce aux techniques de thermographie infrarouge. Ces techniques permettent de mesurer les luminances, d'établir une cartographie (zones isothermes) et de suivre son évolution dans le temps. En maintenance, il ne s'agit pas de connaître avec la plus grande précision la température absolue d'un point, mais plutôt d'identifier les zones thermiques anormales et de quantifier l'urgence d'intervention.

Exemples d'utilisation :

- détection des points chauds dans les équipements électriques (conducteurs sous-dimensionnés, cosses mal vissées, etc..) ou mécaniques (dégradation d'un palier),
- détection des ponts thermiques et donc d'absence d'isolation thermique pouvant être néfaste au composants électroniques sensibles voisin,
- détection des fuites thermiques dans les fours, canalisations, etc...

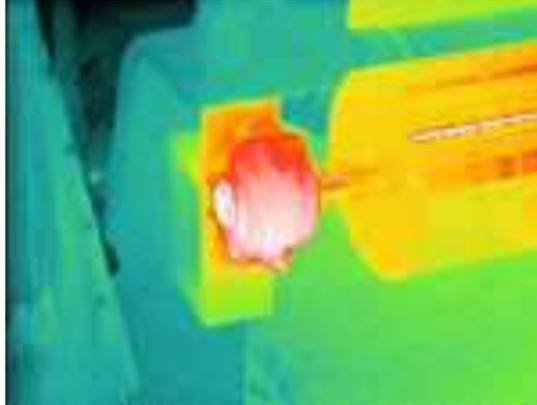


Figure 1-8 : Défaut sur un palier [2]

La thermographie infrarouge est coûteuse, mais c'est un outil très polyvalent.

3. Mesure ultrasonore

Certains instruments ultrasonores sont sensibles à la détection d'émissions sonores de très hautes fréquences comprises entre 20 kHz et 100 kHz. Cette large bande de détection accroît la pertinence du diagnostic. Les signaux sont alors transformés par hétérodynage en fréquences audibles.

La technique consiste à émettre une onde ultrasonore et à mesurer le temps de réception des échos de l'onde à l'aide d'un capteur piézoélectrique.

Les Ultrasons dit "classiques" permettant de détecter des indications au cœur de la matière en utilisant des transducteurs de type Ondes longitudinales ou à Ondes transversales.

Les mesures d'épaisseurs permettent de vérifier l'usure et l'épaisseur restante d'un matériel. (en établissant si besoin, une cartographie des zones examinées et d'étudier son évolution dans le temps).

4. Analyse des huiles

La surveillance des lubrifiants industriels consiste à mesurer l'état de dégradation et de contamination des lubrifiants pour connaître leur capacité à assurer correctement leur fonction. La mesure de la teneur en résidus des huiles et lubrifiants est utilisée comme un bon indicateur des défauts d'usure dans les systèmes mécaniques. Les facteurs responsables de dégradation d'un lubrifiant sont :

- la pollution par des liquides (eau, solvants),
- la pollution par des particules (poussières, matériaux plastiques, fibres, etc..) causée par le processus lui-même et son environnement,
- les particules métalliques dues à l'usure ou la corrosion provenant des composants parcourus par le lubrifiant,
- l'oxydation, en présence d'air ou d'atmosphère corrosive, surtout lorsque les variations de température sont importantes.

La quantité de particules est un indicateur précieux de l'état de dégradation d'une machine. Le type de particules indique en effet la provenance de l'usure, donc la pièce défaillante. Ces analyses peuvent être réalisées en laboratoire grâce à des kits spécifiques d'analyse : centrifugation, gravimétrie, filtration, etc. Ce type d'analyse est parfaitement adapté au contrôle des circuits hydrauliques (presses, robots, etc..) et toutes les machines utilisant l'huile comme lubrifiant (groupe électrogène, compresseur d'air, etc..).

5. Analyse du bruit

Le changement de bruit est souvent un phénomène créé par une défaillance et la mesure du bruit des machines par mesure des vibrations [ISO 7849 (1987)] peut être un indice de défektivité. Le stéthoscope, qui comprend un casque et une sonde, est un instrument qui permet par contact de détecter les composants défectueux par l'écoute des bruits de la machine, pour des fréquences variant entre 30 et 15 000 Hz.

La technique consiste à comparer subjectivement les bruits avec des bruits de référence déjà préenregistrés.

Chapitre 2. Vibration des Machines tournantes

A. Introduction à la vibration

Les vibrations sont le résultat de forces dynamiques à l'intérieur des machines qui comprennent des éléments roulants et à l'intérieur des structures qui sont connectées à la machine.

Ces vibrations peuvent être de plusieurs ordres :

- Vibrations utiles : produit parfois intentionnellement pour effectuer une tâche (sonnettes, bains ultrasoniques, convoyeurs...)
- Vibrations désagréables : voire bruyantes (marteau piqueur...)
- Vibrations fatigantes ou nuisibles : résultat ennuyeux et destructeur d'une utilisation fréquente (Défaut de fixation, jeu excessif...)

Pour d'autres cas, la vibration peut être considérée comme agréable : (berceau, instrument de musique...)

1. Définitions (norme AFNOR 90.001)

La vibration est une variation dans le temps de la valeur d'une grandeur donnée, propre au mouvement, voire de la position d'un système mécanique, lorsque la grandeur dont il est question est soit plus grande soit plus petite que la valeur moyenne connue comme valeur de référence [4]. Un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement autour de la position d'équilibre stable (Figure 2-1).

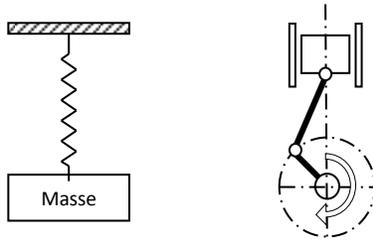


Figure 2-1 : Systèmes oscillants

Un mouvement harmonique est défini par une fonction sinusoïdale (Figure 2-2) du type :

$$X(t) = X_0 \sin(\omega t + \theta) \quad \text{Équation 2-1}$$

Où t désigne la variable temporelle en secondes, ω la pulsation en radians par seconde et θ la position initiale en radian à l'instant $t = 0$

Le mouvement harmonique peut être généralisé par un mouvement périodique s'il y a répétition du mouvement après une période de temps donnée T .

Ainsi on peut écrire :

$$X(t) = X(t + T) \quad \text{Équation 2-2}$$

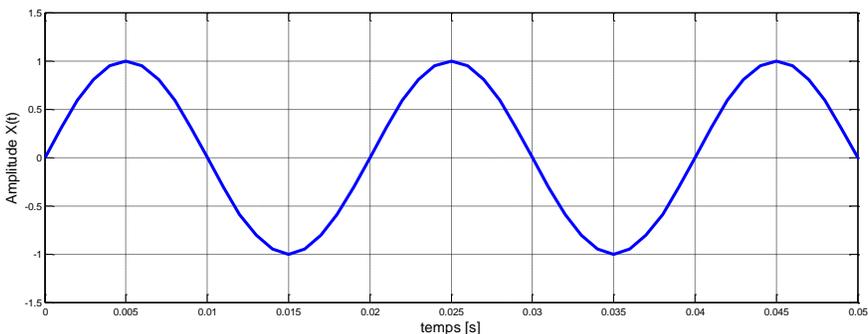


Figure 2-2 : Oscillation harmonique

Les caractéristiques d'une vibration harmonique sont l'amplitude, la fréquence et la phase.

2. Grandeurs caractéristiques des vibrations

a) Fréquence

La fréquence f est le nombre de fois qu'un phénomène se répète pendant un temps donné. Lorsque la seconde est choisie comme unité de temps, la fréquence s'exprime en Hz :

$$1\text{Hz} = \frac{1 \text{ cycle}}{1 \text{ seconde}}$$

La fréquence f est l'inverse de la période T : $f = \frac{1}{T}$

Si l'unité normalisée de la fréquence est le Hertz, on rencontre parfois des valeurs exprimées en CPM (cycles par minute) ou en RPM (rotations par minute). D'où :

$$1\text{Hz} = \frac{1\text{CPM}}{60} = \frac{1\text{RPM}}{60}$$

$f = \frac{N}{60}$ avec N la vitesse de rotation exprimée en tours par minute.

Gamme des fréquences :

- Basses fréquences < 100 Hz
- 100 Hz < Moyennes fréquences < 1000 Hz
- 1000 Hz < Hautes fréquences

b) Amplitude

L'amplitude d'une vibration est la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre. On peut définir que :

- l'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelée amplitude de crête A_c ,
- l'amplitude double appelée aussi l'amplitude de crête à crête A_{cc} ,
- l'amplitude efficace appelée aussi RMS (Root Mean Square) ou niveau efficace noté : A_{eff} ou A_{rms} .

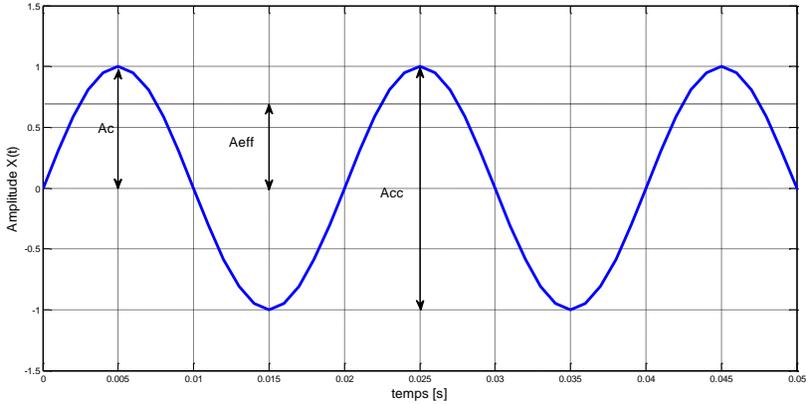


Figure 2-3 : Amplitude d'une vibration harmonique

Pour un signal de vibration complexe, il n'y a pas de relation simple entre la valeur de crête et la valeur efficace. Par contre on peut dire que :

$$A_{eff} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} A^2(t) dt} \quad \text{Équation 2-3}$$

$A(t)$: Amplitude instantanée, $t_2 - t_1$: Durée d'analyse du signal.

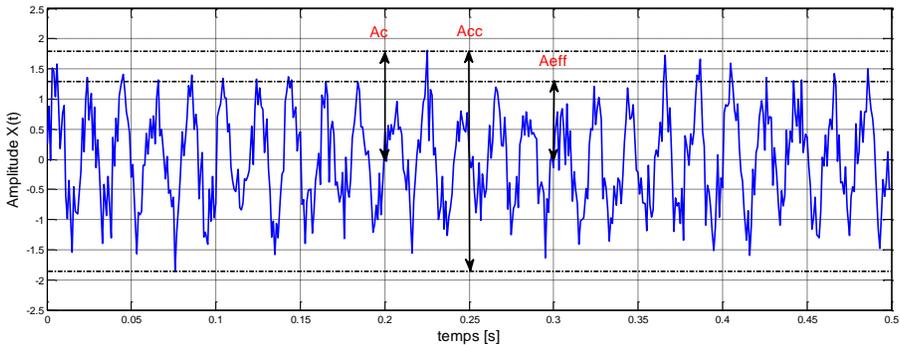


Figure 2-4 : Amplitude d'une vibration non harmonique

Pour un signal de type sinusoïdal :

$$A_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T A_c^2 \sin^2(2\pi f \times t) dt} \Rightarrow A_{eff} = \frac{A_c \sqrt{2}}{2} = 0.707A_c$$

c) La phase

Soit deux vibrations représentées par les équations suivantes :

$$X_1(t) = X_{10} \sin(\Omega t) \quad \text{Équation 2-4}$$

$$X_2(t) = X_{20} \sin(\Omega t + \theta) \quad \text{Équation 2-5}$$

On constate que si leur période est la même, il n'en va pas de même pour leur déplacement maximal qui n'est pas atteint au même temps. En effet l'un est décalé d'un intervalle de temps Δt telle que $\theta = \Omega \Delta t$ appelé angle de phase. Δt représente le laps de temps au cours de laquelle cette grandeur est avancée ou retardée, par rapport à l'origine de la variable temporelle.

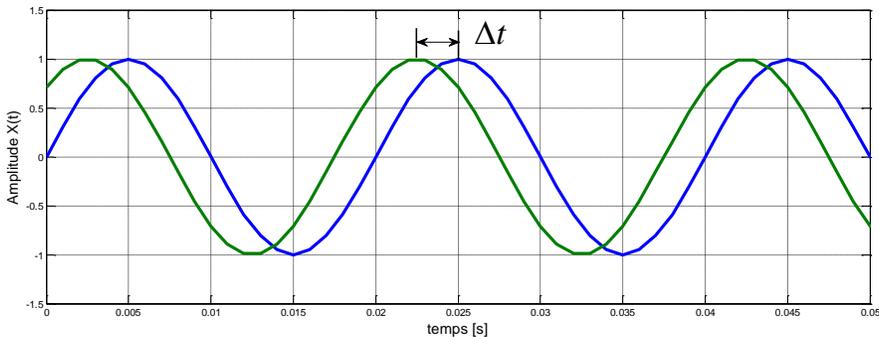


Figure 2-5 : Déphasage entre deux signaux harmoniques

3. Grandeur cinématique

Si l'on observe un système mécanique simple constitué d'une masselotte suspendue à un ressort (Figure 2-1), on constate que le mouvement de la masselotte se traduit par un déplacement, une vitesse et une accélération. Il faut également noter qu'il existe une relation mathématique entre déplacement, vitesse et accélération.

$$\text{Déplacement} \quad \left[\frac{\partial}{\partial t} \right] \quad \text{Vitesse} \quad \left[\frac{\partial}{\partial t} \right] \quad \text{Accélération}$$

a) Dérivation

Considérant une oscillation harmonique, définie par sa fonction de déplacement (Figure 2-6 a).

$$X(t) = X_0 \sin(2\pi \times f \times t) \quad \text{Équation 2-6}$$

La vitesse représente la dérivée du déplacement par rapport au temps (Figure 2-6 b).

$$\begin{aligned} V(t) &= \frac{dX(t)}{dt} \\ &= 2\pi f \times X_0 \cos(2\pi f \times t) \\ &= V_0 \sin\left(2\pi f \times t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad \text{Équation 2-7}$$

Par conséquent, nous pouvons dire que la vitesse est un signal harmonique déphasé de 90 degrés par rapport au déplacement avec la même fréquence dont l'amplitude est égale :

$$V_0 = 2\pi f \times X_0 \quad \text{Équation 2-8}$$

L'accélération est la dérivée de la vitesse par rapport au temps.

$$A(t) = \frac{dV(t)}{dt} = -(2\pi f)^2 \times X_0 \sin(2\pi \times f \times t) \quad \text{Équation 2-9}$$

L'accélération est déphasée par rapport à la vitesse de 90 degrés (Figure 2-6 c), donc en opposition de phase avec le déplacement.

b) Intégration

Dans le cas pratique en générale on mesure la force dynamique générée par un système en vibration qui est proportionnelle à l'accélération du mouvement vibratoire à l'aide d'un capteur d'accélération (accéléromètre):

$$A(t) = A_0 \sin(2\pi \times f \times t) \quad \text{Équation 2-10}$$

Les autres paramètres cinématique sont obtenus par intégration durant un intervalle de temps. On obtient ainsi la vitesse de déplacement par une première intégration :

$$V(t) = \int_0^t A(\tau) d\tau = -\frac{A_0}{2\pi \times f} \cos(2\pi \times f \times t) \quad \text{Équation 2-11}$$

De même pour l'indicateur de déplacement :

$$X(t) = \int_0^t V(\tau) d\tau = -\frac{A_0}{(2\pi \times f)^2} \sin(2\pi \times f \times t) \quad \text{Équation 2-12}$$

On constate qu'il existe une relation très simple entre les amplitudes de déplacement, vitesse et accélération :

$$A_0 = 2\pi f \times V_0 = (2\pi f)^2 X_0 \quad \text{Équation 2-13}$$

$$X_0 = \frac{1}{2\pi f} \times V_0 = \frac{1}{(2\pi f)^2} \times A_0 \quad \text{Équation 2-14}$$

- Un phénomène vibratoire induit par un phénomène quelconque se traduira par un déplacement significatif si sa fréquence est faible. C'est la raison pour laquelle la mesure en mode déplacement n'est généralement utilisée que pour mettre en évidence des phénomènes basses fréquences.
- La mesure en mode vitesse permet d'observer correctement des phénomènes dont la fréquence n'est pas trop élevée (moyenne fréquence).

- La mesure en mode accélération (directement proportionnelle à la force dynamique induisant le mouvement) permet de mettre en évidence des phénomènes de hautes fréquences.

Tableau 2-1 : Variation des amplitudes en fonction de la fréquence

	X_0	V_0	A_0
$f_0 = 0.1$	1.59	1	0.628318
$f_0 = 1$	0.159	1	6.28318
$f_0 = 10$	0.0159	1	62.8318
$f_0 = 100$	0.00159	1	628.318
$f_0 = 1000$	0.000159	1	6283.18

Pour chercher un défaut, selon que la fréquence en composante vibratoire induit se situe en basses, moyennes ou hautes fréquences, on mesure respectivement en mode déplacement, vitesse ou accélération. (voir Tableau 2-1).

a) Unités

Les unités de mesure utilisées en surveillance vibratoire sont des unités proportionnelles aux grandeurs physiques mesurables au cours d'une campagne de mesure.

Tableau 2-2: Unités de mesure des vibrations

Unité	Déplacement	Vitesse	Accélération
SI	Mètre (m)	Mètre par seconde (m/s)	Mètre par seconde carré (m/s ²)
Analyse vibratoire	Micromètre (μm)	Millimètre par seconde (mm/s)	Pesanteur ($g=9.81\text{m/s}^2$) ou ($\text{mg}=10^{-3}\text{g}$)

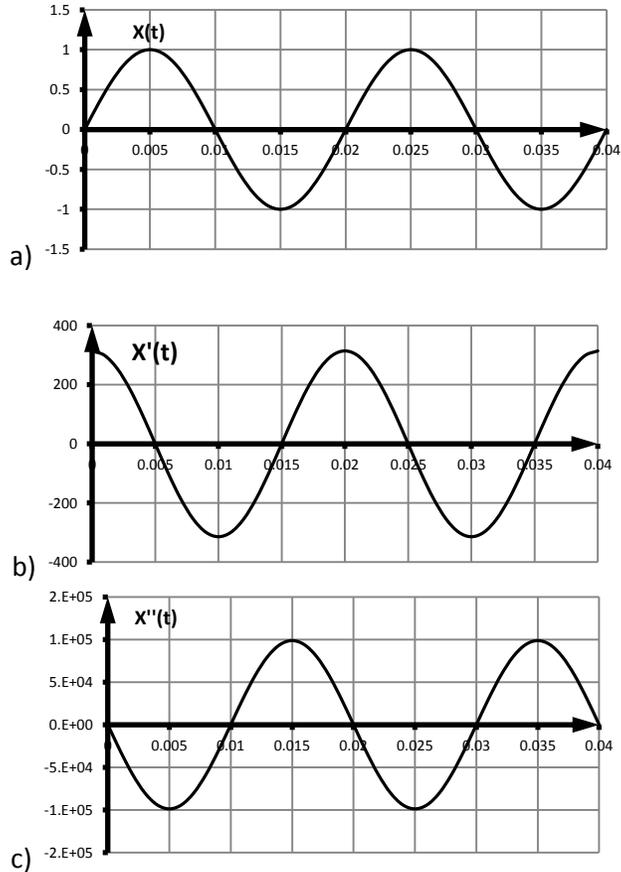


Figure 2-6 : Grandeurs associées à un signal vibratoire
a) déplacement; b) vitesse; c) accélération

4. Nature de vibration

Une machine tournante quelconque, en fonctionnement, génère des vibrations que l'on peut classer de la façon suivante:

a) Sinusoïdal simple

Les vibrations périodiques de type sinusoïdal simple, sont appelées ainsi par référence à la forme du signal qu'elle génère, qui est représenté par une sinusoïde.

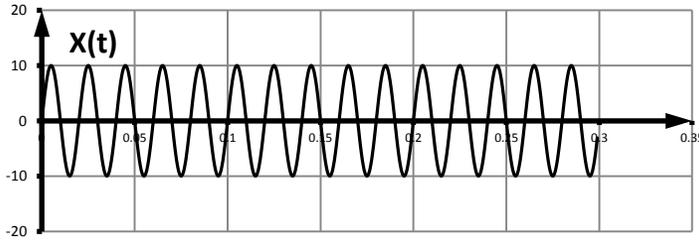


Figure 2-7 : Signal sinusoïdal simple

La fonction analytique est donnée par la formule suivante :

$$X(t) = X \sin(2\pi f \times t) ;$$

La périodicité de fonction lui permet d'écrire $X(t) = X(t + T)$.

b) Sinusoïdal complexe

Les fonctions sinusoïdales complexes sont formées de deux ou plusieurs fonctions sinusoïdales simples.

$$X(t) = \sum_{i=1}^{n \geq 2} X_i(t) = \sum_{i=1}^{n \geq 2} A_i \sin\left(2\pi \frac{t}{T_i}\right)$$

Équation 2-15

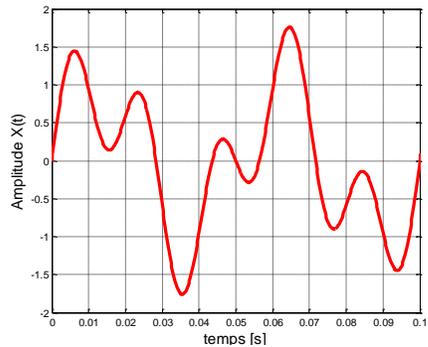
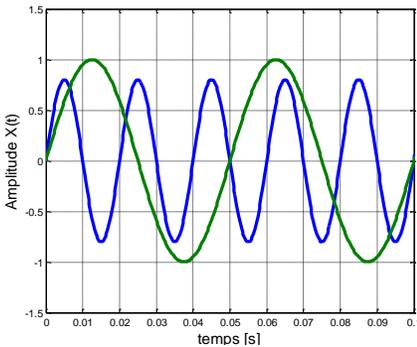


Figure 2-8 : Exemple 1 Fonction sinusoïdale complexe

La Figure 2-8 illustre la somme de deux fonctions sinusoïdales simples.

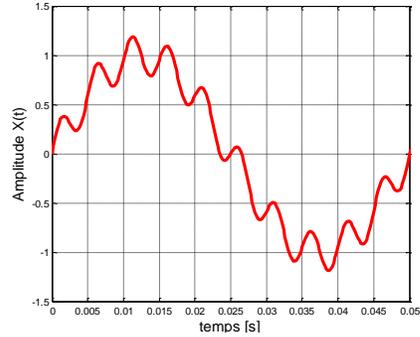
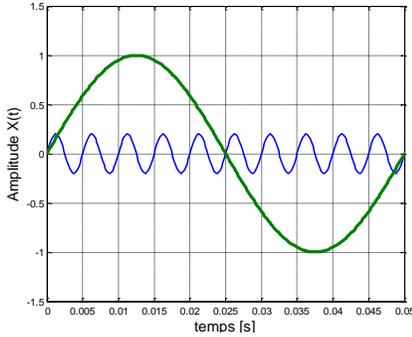


Figure 2-9 : Exemple 2 Somme de deux fonctions sinusoïdales simples

Dans l'exemple 2 illustré dans la Figure 2-9 :

$$X(t) = A_0 \sin(2\pi f_0 t) + A_1 \sin(2\pi f_1 t) \quad \text{Équation 2-16}$$

avec $f_1 \ll f_0$.

c) Modulation angulaire de phase et de fréquence

Un signal sinusoïdal s'exprime de la façon suivante :

$$X(t) = X \cos(\theta_i(t)) \quad \text{Équation 2-17}$$

Dont la pulsation instantanée est :

$$\omega_i(t) = 2\pi f_p + 2\pi K_f m(t) \quad \text{Équation 2-18}$$

Par définition, la fréquence instantanée est commandée par le signal modulant $m(t)$ autour d'une porteuse f_p .

La phase instantanée du signal modulé est donnée par l'expression suivante :

$$\theta_i(t) = \int \omega_i(t) dt = 2\pi f_p t + 2\pi K_f \int m(t) dt \quad \text{Équation 2-19}$$

(1) Modulation de fréquence

Dans le cas où le signal modulant est sinusoïdal :

$$m(t) = V_m \cos(2\pi f_m t) \quad \text{Équation 2-20}$$

La fréquence instantanée varie dans l'intervalle suivant $f_p - \Delta f < f_i < f_p + \Delta f$. $\Delta f = K_f V_m$ est appelé l'excursion en fréquence.

Le signal modulé est donné par l'expression suivante :

$$X(t) = X \cos(2\pi f_p t + \delta \sin(2\pi f_m t)) \quad \text{Équation 2-21}$$

On appelle $\delta = \frac{\Delta f}{f_m}$ indice de modulation.

Lorsque la fréquence du phénomène varie de manière périodique dans le temps, on dit qu'il y a modulation de fréquence. Dans ce cas la période est variable au cours du temps.

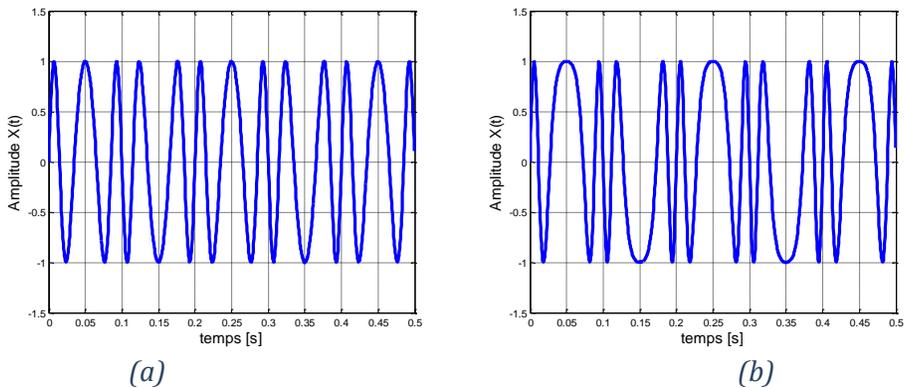


Figure 2-10 : Modulation de fréquence

$$f_p = 25 \text{ Hz}, f_m = 10 \text{ Hz (a) } \delta = 1 \text{ (b) } \delta = 4$$

(2) Modulation de phase

On écrit que la phase $\theta_i(t)$ est proportionnelle au signal modulant :

$$\theta_i(t) = 2\pi f_p t + K_\phi m(t) \quad \text{Équation 2-22}$$

L'expression du signal modulé est :

$$X(t) = X \cos(2\pi f_p t + K_\phi m(t)) \quad \text{Équation 2-23}$$

Quand $m(t)$ est sinusoïdal :

$$m(t) = V_m \cos(2\pi f_m t) \quad \text{Équation 2-24}$$

La grandeur $\Delta\phi = V_m K_\phi$ s'appelle l'excursion en phase.

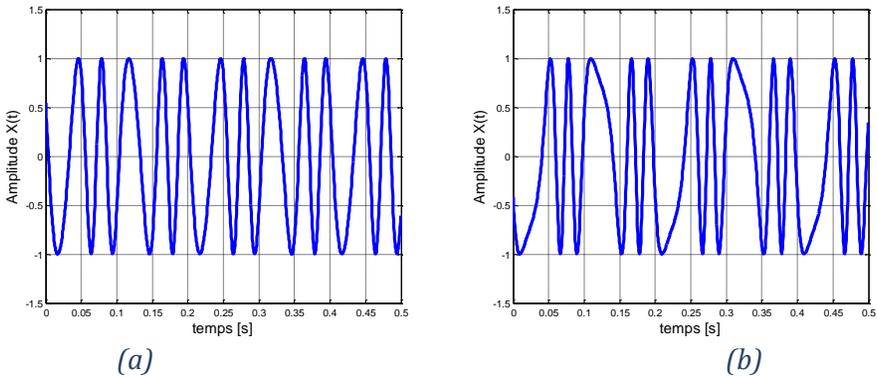


Figure 2-11 : Modulation de phase

$$f_p = 25 \text{ Hz}, f_m = 10 \text{ Hz (a) } \Delta\phi = 1 \text{ (b) } \Delta\phi = 2$$

La modulation de phase est un signal dont la phase varie en fonction du temps.

$$X(t) = X \cos(2\pi f_p t + \Delta\phi \cos(2\pi f_m t)) \quad \text{Équation 2-25}$$

d) Modulation d'amplitude

Certains phénomènes, ou défauts, apparaissent à une fréquence donnée mais l'amplitude de ces phénomènes varie avec le temps.

La modulation d'un signal peut être décrite comme étant la variation périodique de l'amplitude d'un signal en fonction du temps.

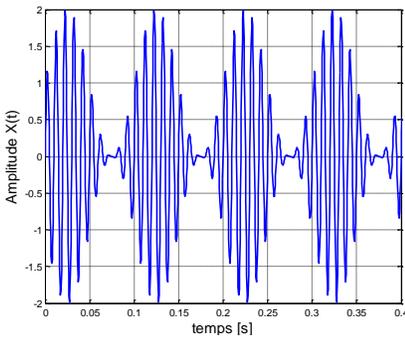
Une modulation est l'origine d'une vibration de fréquence fixe dont l'amplitude n'est pas constante dans le temps.

$$X(t) = A_0 \left[1 + m \times \sin(2\pi f_m t) \right] \times \sin(2\pi f_0 t) \quad \text{Équation 2-26}$$

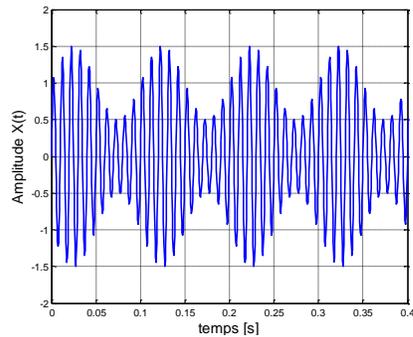
Avec :

f_0 : fréquence de base, f_m : fréquence de modulation.

Et m : le taux de modulation



(a)



(b)

Figure 2-12 : Modulation d'amplitude (battement)

$$f_0 = 100 \text{ Hz}, f_m = 10 \text{ Hz (a) } m = 1 \text{ (b) } m = 0.5$$

e) Impulsionnelle périodique

Les vibrations périodiques de type impulsionnelles sont appelées ainsi par référence aux forces qu'elles génèrent et à leurs caractères brutaux, brefs et périodiques.

Ces chocs peuvent être produits par des phénomènes normaux tels que dans les presses automatiques, les broyeurs à marteau et les

compresseurs à piston, ou par un événement anormal comme l'écaillage des roulements et les défauts sur engrenage.

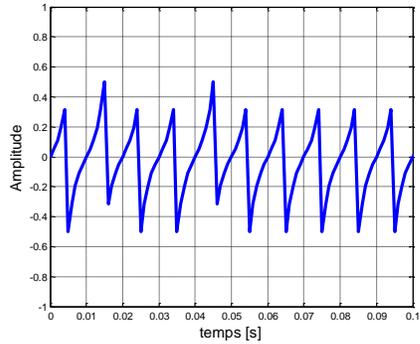
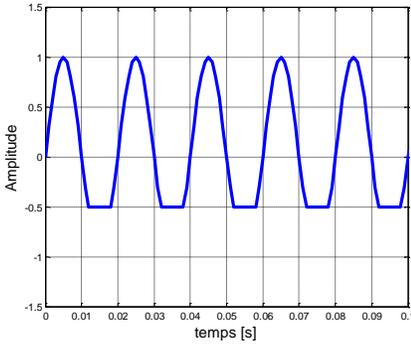


Figure 2-13 : Signaux impulsionnels

f) Impulsionnelle complexe

Les vibrations impulsionnelles complexes sont des vibrations aléatoires qui peuvent être générées par plusieurs défauts, par exemple lubrification sur un roulement, une cavitation d'une pompe...

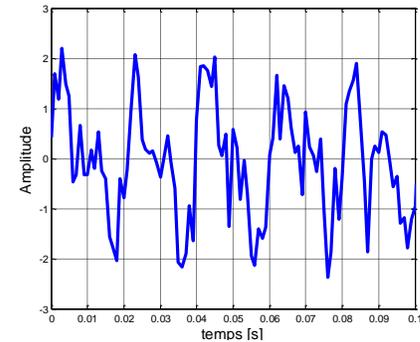
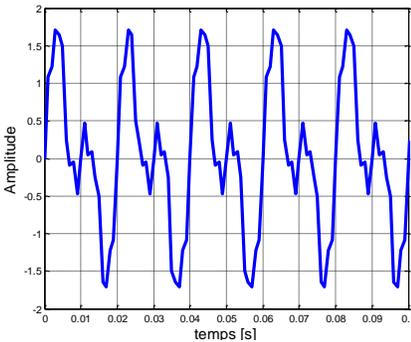


Figure 2-14 : Signaux impulsionnels complexes

g) Bruit blanc

L'expérience montre qu'au signal « utile » se superposent toujours des signaux parasites ou bruit qui peuvent avoir plusieurs origines :

- Les bruits peuvent être d'origine électrique ou électronique. Dans ce cas il faut vérifier les isolations, les mises à la terre, les connexions...
- Les bruits peuvent être induits par des transitoires d'origine physique tels que la cavitation ...

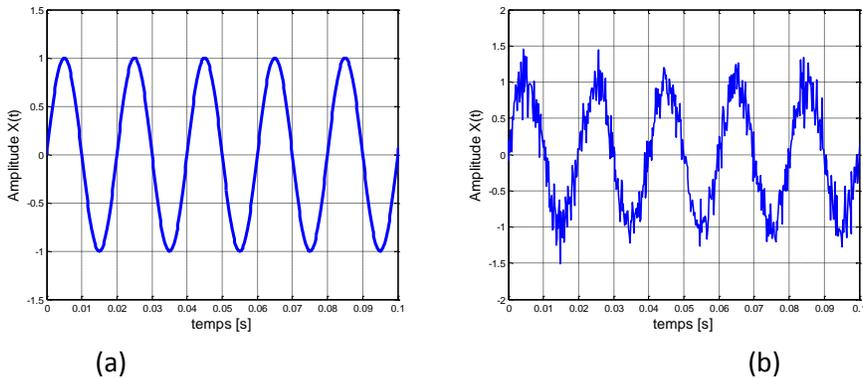


Figure 2-15 : (a) Signal harmonique simple ; (b) Signal avec bruit blanc

B. Les indicateurs des vibrations

L'indicateur de vibration est le paramètre le plus significatif de l'état d'une machine tournante. L'augmentation de celui-ci est révélatrice de la dégradation de l'état mécanique de cette machine. Les méthodes les plus appliquées pour le suivi vibratoire des machines tournantes sont résumées dans le diagramme suivant (Figure 2-16).

1. Indicateurs énergétiques

Ce sont bien souvent des indicateurs scalaires représentatifs de l'énergie partielle ou totale du signal et dont les valeurs dépendent du choix :

- de la grandeur physique représentative du mouvement vibratoire (accélération, vitesse, déplacement), selon la nature du capteur utilisé.
- de la grandeur représentative de l'amplitude (valeur efficace, amplitude crête, Kurtosis...),

- de la bande de fréquences dans laquelle l'indicateur est mesuré ou calculé. Selon l'étendue de la bande fréquentielle considérée, on parle alors d'indicateurs scalaires « large bande » ou de « niveaux globaux » ou d'indicateurs scalaires « bande étroite » voire « bande fine »,
- du temps d'observation du signal qui doit impérativement être adapté à la périodicité des phénomènes que l'on cherche à identifier.

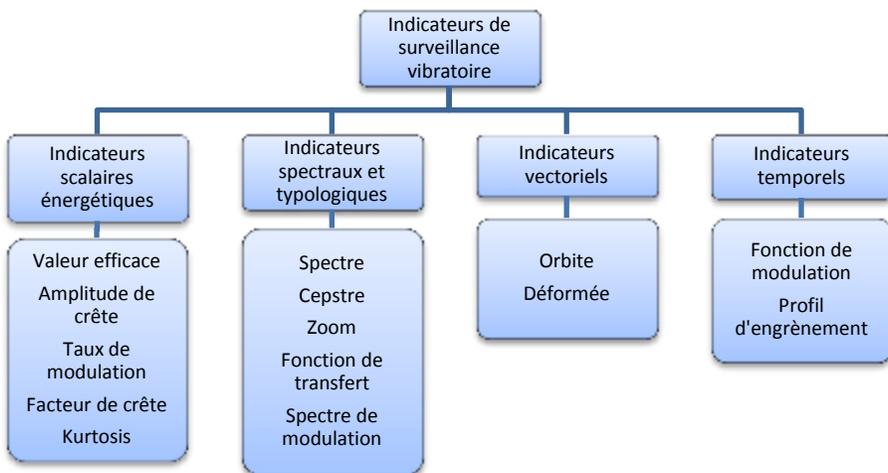


Figure 2-16 : Classification des indicateurs de surveillance

a) *Indicateur scalaire « larges bandes » (Niveau global)*

Le terme niveau global est l'appellation consacrée aux indicateurs scalaires « larges bandes ».

Il est assimilé à l'énergie vibratoire lorsque la grandeur cinématique représentée par le signal est la vitesse vibratoire.

La chaîne d'acquisition du niveau global est donnée par la figure suivante (Figure 2-17). Le signal vibratoire mesuré par le capteur traité ensuite par

filtration puis calculé par l'une des paramètres tel que amplitude efficace, puissance du signal ...

La mesure du niveau global permet de suivre de manière fiable une machine, mais elle ne permet pas d'établir un diagnostic. En effet pour une valeur en déplacement, vitesse ou accélération, tous les phénomènes mécaniques sont confondus (Balourd, lignage, engrènement, roulement...). Donc la mesure du niveau global permet d'émettre un appréciation sur la situation du phénomène en fréquence (d'origine basse ou haute fréquence).

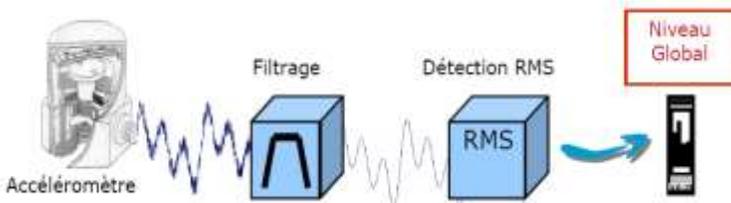


Figure 2-17 : Chaîne de mesure du niveau global

(1) Amplitude efficace

La méthode du niveau global, consiste à apprécier le niveau vibratoire de la machine en mesurant la valeur efficace de ces vibrations et de la comparer aux seuils de jugement préconisés par les normes. Selon la norme, l'intensité vibratoire est une grandeur caractérisant de façon simple et globale, l'état vibratoire d'une machine (cf. Équation 2-3)

Soit A l'amplitude de l'accélération. A est une fonction de la fréquence (pour une mesure réalisée lors d'une campagne) et du temps (la valeur évolue d'une campagne de mesures à l'autre). On nomme la première mesure de cette grandeur A_0 , c'est celle qui fait référence. Elle constitue la signature.

$$A (dB) = 20 \log \left(\frac{A}{A_0} \right)$$

Équation 2-27

(2) Puissance PWR (power)

Le niveau de puissance est l'image de la puissance contenue dans le signal. Il est exprimé en unité physique au carré (V^2 ou g^2 par exemple).

$$PWR = V_{eff}^2 \quad \text{Équation 2-28}$$

Il est donc normal de ne pas lire les mêmes niveaux exprimés en unité physique RMS et PWR. En revanche, ils sont identiques quand ils sont exprimés en dB, car :

$$20 \log \left(\frac{A}{A_0} \right) = 10 \log \left(\frac{A^2}{A_0^2} \right) \quad \text{Équation 2-29}$$

(3) Facteur de crête

C'est le rapport entre l'amplitude du pic du signal et la valeur efficace du signal. Un facteur de crête élevé signifie que le signal possède une puissance maximale importante devant sa puissance moyenne, et donc que certaines valeurs prises par ce signal sont importantes par rapport aux valeurs moyennes. Autrement dit ceci signifie que des pics d'amplitude importante sont présents.

Étant donné que la vibration d'un rotor en bon état devrait être de type harmonique, le rapport de crête correspondant, défini par le rapport de l'amplitude crête sur l'amplitude efficace, devrait être proche de $\sqrt{2}$. Si une dégradation survient, la vibration devient alors aléatoire et le rapport de crête devient supérieur à 3. Le suivi du rapport de crête permet donc de détecter les apparitions de défauts, sans toutefois permettre d'en diagnostiquer la source.

$$FC = \frac{A_c}{A_{eff}} \quad \text{Équation 2-30}$$

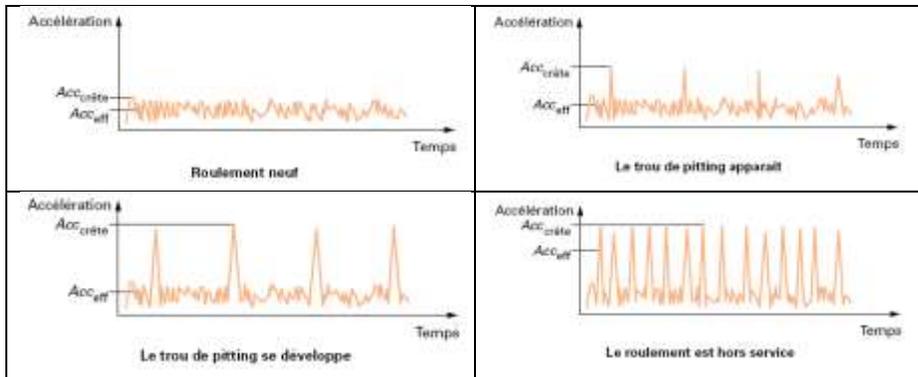


Figure 2-18 : Evolution des amplitudes efficace et de crête [5]

Quand un roulement se dégrade, l'évolution du facteur de crête est caractéristique. (Voir Figure 2-18).

- Au début ce facteur est sensiblement constant. Il est lié à l'état de surface du roulement dont les aspérités tendent à être réduites.
- Lorsqu'un défaut localisé se développe, les petits chocs résultants accroissent notablement le niveau de crête, mais, peu nombreux, ils ont une influence faible sur la valeur efficace.
- Le niveau de crête augmente ensuite jusqu'à un maximum lié à la profondeur du défaut qui augmente.
- Au fur et à mesure que le roulement se détériore, il y a davantage d'impacts générés à chaque passage de bille. Le niveau efficace augmente donc, tandis que le niveau de crête reste inchangé.
- Vers la fin de vie du roulement, le facteur de crête peut retomber à sa valeur initiale car la valeur de crête a augmenté à son tour.

Le défaut majeur de cet indicateur est de présenter les mêmes valeurs dans les deux cas extrêmes (état neuf et fin de vie du roulement) seule son évolution est significative. (Voir Figure 2-19).

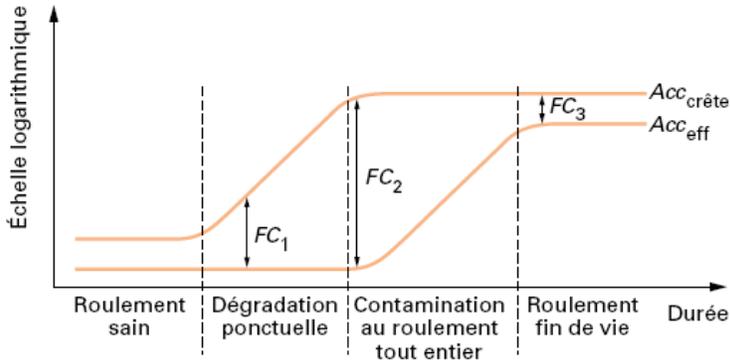


Figure 2-19 : Evolution du facteur de crête d'un roulement [5]

(4) Kurtosis

Le Kurtosis est un dérivé de la méthode précédente basée sur le facteur de crête. Le Kurtosis correspond au rapport du moment d'ordre 4 du signal vibratoire sur le carré de la puissance du signal.

$$A_{Kurtosis} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^{+\infty} A^4(t) dt}{\left(\frac{1}{T} \int_0^{+\infty} A^2(t) dt \right)^2} \quad \text{Équation 2-31}$$

Le Kurtosis est plus sensible pour détecter les chocs que le facteur de crête.

b) Inconvénients des indicateurs larges bandes

(1) Identification des défauts

Le suivi en niveau global permet de détecter un dysfonctionnement mais pas de le l'identifier. En effet le niveau global réagit indifféremment à plusieurs types de défauts.

Ces indicateurs présentent plusieurs inconvénients majeurs qui de fait limitent considérablement leur fiabilité d'utilisation et leur capacité de

détection de défauts à un stade précoce dans le cadre de la surveillance des machines :

- La forte dépendance de la sensibilité avec la nature des défauts.
- L'absence de relation formelle entre gravité du défaut et l'énergie vibratoire induite à cause notamment de la nature du défaut, du transfert mécanique et de la très forte influence de la vitesse de rotation de la ligne d'arbre présentant le défaut.
- Le manque de pertinence de la notion de **seuil** dès qu'elle est dissociée de la **cause** qui engendre le phénomène vibratoire, de la nature de la machine, de ses conditions de fonctionnement et de son environnement. Ainsi, une valeur efficace de la vitesse vibratoire [10 – 1000 Hz] de 6 mm/s ne présente pas le même degré de gravité si elle est la conséquence d'un déséquilibre, d'un désalignement ou d'un écaillage de bague de roulement, si la machine est un ventilateur ou une rectifieuse de précision et si elle repose au niveau du sol sur une fondation lourde ou en hauteur sur une charpente métallique par l'intermédiaire de plots élastiques.

(2) Effet de masque

C'est l'écueil principal de la surveillance par indicateurs « large bande » qui limite considérablement le domaine d'utilisation et la fiabilité de ce mode de surveillance. En effet, si la puissance d'un signal est une grandeur physique additive, sa valeur efficace qui en dérive ne l'est pas. Cela signifie que si A représente la valeur efficace du signal vibratoire en absence du défaut et D la valeur efficace du signal induit par un défaut, la puissance du signal après apparition de ce défaut devient égale à : $A_d^2 = A^2 + D^2$ et sa valeur efficace $A_d = \sqrt{A^2 + D^2} = A\sqrt{1 + D^2/A^2}$ cette dernière relation montre la valeur efficace de l'amplitude du signal augmentera de manière significative si $\frac{D^2}{A^2} > 1$.

L'effet de masque qui entache fortement la sensibilité des indicateurs larges bandes lorsque l'énergie vibratoire induite par l'apparition d'un défaut n'est pas prépondérante devant celle induite par l'ensemble des forces dynamiques générées par le fonctionnement de la machine et des défauts déjà existants.

Si on considère un système qui présente plusieurs défauts : Délignage ; Balourd ; Roulement et Frottement tel que l'amplitude du signal de chacun des défauts respectivement a, b, c et d.

$$\text{Le niveau global est : } NG = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2}$$

	Délignage « a » mm/s	Balourd « b » mm/s	Roulement « c » mm/s	Frottement « d » mm/s	NG mm/s	Variation du paramètre %	Variation du NG %
1^{ère} mesure	3	2	0,5	1	3,77		
2^{ème} mesure	3,9	2	0,5	1	4,52	30%	~20%
3^{ème} mesure	3	2	1,5	1	4,03	300%	~7%

On remarque qu'une évolution importante (300%) du défaut de roulement a affecté le NG de 7%, tandis que le changement mineur (30%) dans la valeur efficace du défaut de délignage entraîne une variation du NG de 20%.

c) Indicateur scalaire « bandes étroites » (octave, 1/3 et 1/n octave)

Fiabiliser la surveillance par indicateurs scalaires énergétiques nécessite de minimiser les incidences de l'effet de masque et de différencier les seuils en fonction de la nature des défauts. Pour cela, il suffit de réduire la gamme fréquentielle dans laquelle ces indicateurs sont mesurés ou calculés en la rendant compatible avec l'étendue spectrale «

utile » de la manifestation vibratoire du défaut recherché et en lui associant des seuils adaptés à la nature de ce dernier

L'analyse en fréquence par bandes tiers d'octave correspond approximativement à la résolution fréquentielle de l'oreille humaine. Le spectre d'un son est composé d'un grand nombre de valeurs de fréquences et des niveaux correspondants. Dans la pratique, pour caractériser le bruit par un ensemble de valeurs réduit, on découpe le domaine des fréquences en bandes d'octave ou tiers d'octaves (Figure 2-20). Chaque bande de fréquence normalisée est repérée par sa fréquence centrale. L'analyse en bande d'octaves permet de soupçonner la création d'un défaut, mais on perd l'information fréquentielle nécessaire à un bon diagnostic. Par contre le nombre de données à gérer est très faible.

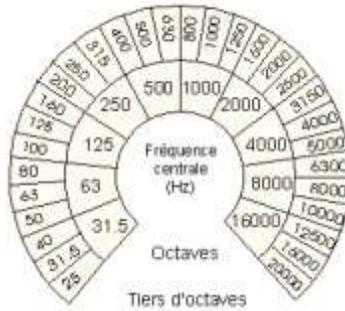


Figure 2-20 : Fréquences normalisées en octaves et tiers d'octaves [8]

Une analyse en tiers d'octave permet de diagnostiquer, mais avec beaucoup moins de précision que ne le permet une analyse en bande fine. Par contre le nombre de données à gérer est moins important.

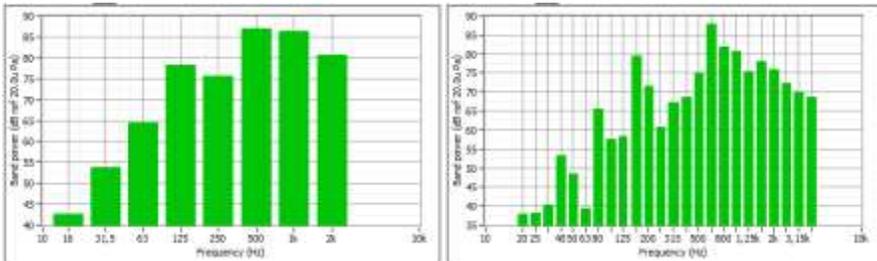


Figure 2-21 : Exemple de spectre en 1 octave et 1/3 octave

2. Indicateurs spectraux et typologiques

La mesure de la sévérité vibratoire permet de savoir si le comportement vibratoire d'une machine dépasse les limites admissibles. Mais au vu des résultats, il n'est pas possible d'émettre une hypothèse sur les causes et les excitateurs de vibration. Ces informations ne pourront être obtenues qu'en réalisant une analyse en fréquence.

Le diagnostic vibratoire se base pour l'identification du phénomène mécanique, à la fréquence de la vibration qu'il génère.

a) *Analyse Spectrale*

La résolution en bande fine est plus riche en information. Pour cela il faut donc représenter la vibration dans l'espace des fréquences; cette opération se réalise mathématiquement en effectuant une transformée de FOURIER du signal temporel vibratoire. Le résultat est appelé SPECTRE fréquentiel.

Chaque composant du spectre correspond à une fréquence caractéristique bien définie (déséquilibre, résonance, engrènement, lignage...). L'analyse en fréquence s'effectue en général lorsque le niveau vibratoire de la machine est jugé supérieur au seuil admissible.

Le diagnostic vibratoire est basé sur l'identification de la fréquence générée par un phénomène mécanique.

La transformée de Fourier, lorsqu'elle s'applique à une fonction du temps (comme l'accélération, la vitesse ou le déplacement), donne pour résultat une autre fonction dont la variable est la fréquence.

La représentation graphique de cette nouvelle fonction s'appelle « spectre ». Le spectre permet d'identifier rapidement tous les termes d'ordre N de la fonction du temps.

Autrement dit, appliqué aux vibrations recueillies par l'accéléromètre, il offre une image sur laquelle sont dissociés tous les mouvements élémentaires composant le mouvement total de la machine surveillée.

(1) Transformée de Fourier

Soit un signal $X(t)$ à temps continu. La transformée de Fourier de $X(t)$ est la fonction [15]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t)e^{-2i\pi ft} dt \quad \text{Équation 2-32}$$

En approchant l'intégrale par une somme d'aires de rectangles de durée T_e et en limitant la durée d'intégration à l'intervalle $[0, (N-1) T_e]$, on obtient:

$$X(f) \approx T_e \sum_{n=0}^{N-1} X(nT_e)e^{-2i\pi n.f.t} \quad \text{Équation 2-33}$$

Ce qui donne pour une valeur de $f_k = \frac{kf_e}{N}$.

$$X(f_k) \approx T_e \sum_{n=0}^{N-1} X(nT_e)e^{-2i\pi n \frac{kf_e T_e}{N}} \approx T_e \sum_{n=0}^{N-1} X(nT_e)e^{-2i\pi \frac{n.k}{N}} \quad \text{Équation 2-34}$$

Ce n'est pas une approximation sophistiquée de $X(f)$, mais elle est très utilisée en pratique sous le nom de TFD [15] (Transformée de Fourier Discrète) car il existe un algorithme de calcul efficace appelé FFT (Fast Fourier Transform) ou TFR (Transformée de Fourier Rapide).

La transformée de Fourier permet de décomposer une vibration non sinusoïdale en une somme de vibration sinusoïdale.

$$X(t) = \sum_{n=1}^N X_n \sin(2\pi f_n t) \quad \text{Équation 2-35}$$

La transformée de Fourier donne le spectre d'un signal temporel caractérisé par son amplitude et sa fréquence.

(2) Vibration Harmonique

$$X(t) = X_0 \sin(2\pi f_0 \times t) \quad \text{Équation 2-36}$$

Le spectre d'une vibration harmonique est représenté par un pic à la fréquence f_0 .

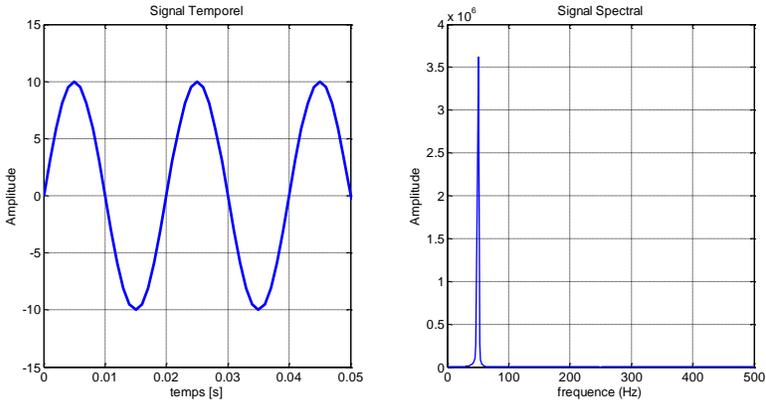


Figure 2-22 : Vibration harmonique

(3) Vibration non harmonique

$$X(t) = X_{10} \sin(2\pi f_1 \times t) + X_{20} \sin(2\pi f_2 \times t) \quad \text{Équation 2-37}$$

Le spectre d'une vibration non harmonique est représenté par deux pics aux fréquences f_1 et f_2

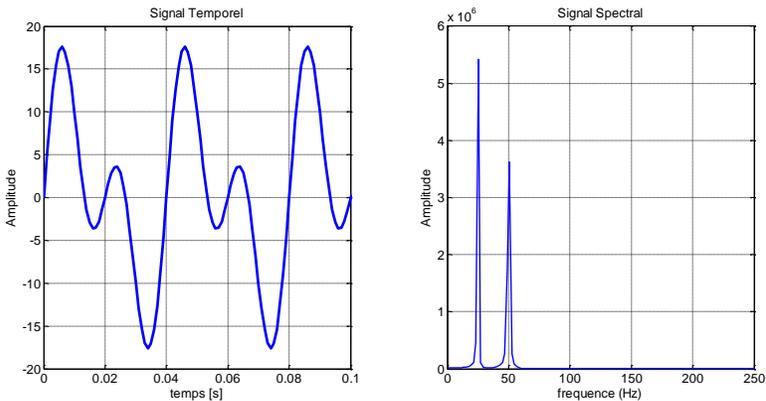


Figure 2-23 : Vibration Non Harmonique

(4) Modulation d'amplitude

$$X(t) = X_0 \left[1 + m \times \sin(2\pi f_m t) \right] \times \sin(2\pi f_0 t) \quad \text{Équation 2-38}$$

avec $f_m \ll f_0$

La fonction peut s'écrire :

$$X(t) = X_0 \sin(2\pi f_0 t) + \frac{mX_0}{2} \left[\cos(2\pi(f_0 - f_m)t) - \cos(2\pi(f_0 + f_m)t) \right]$$

Équation 2-39

Pour une fréquence de base $f_0 = 100\text{Hz}$, fréquence de modulation $f_m = 10\text{Hz}$ et un rapport de modulation $m = 1$.

Le spectre d'une modulation d'amplitude est représenté par un pic à la fréquence f_0 deux pics aux fréquences $f_0 \pm f_m$.

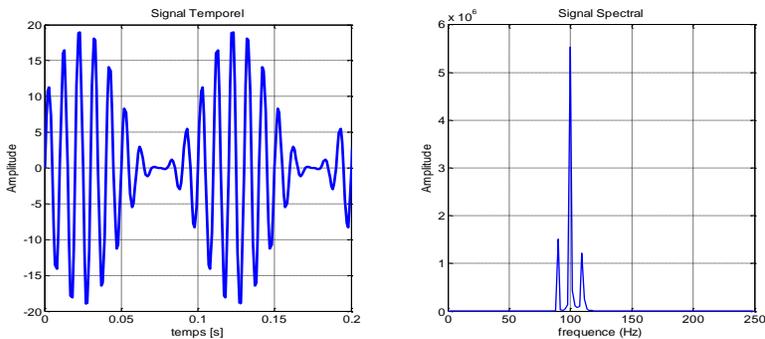


Figure 2-24 : Modulation d'Amplitude

(5) Modulation de fréquence

$$X(t) = X_0 \cos(2\pi f_p \times t + \beta \cos(2\pi f_m \times t)) \quad \text{Équation 2-40}$$

Pour une fréquence porteur $f_p = 50\text{Hz}$, fréquence de modulation $f_m = 15\text{Hz}$ et un indice de modulation $\beta = 1$.

Le spectre d'une modulation de fréquence se manifeste par un pic à la fréquence de base f_p plus des modulations d'intervalle f_m de part et d'autre de la fréquence de base $f_p \pm n \times f_m$.

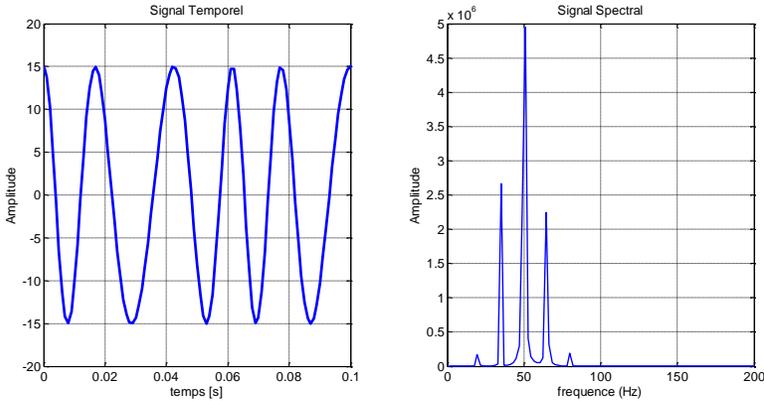


Figure 2-25 : Modulation de Fréquence

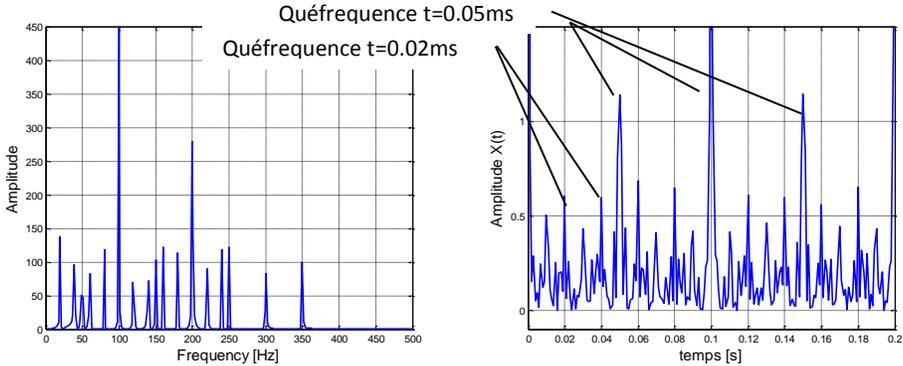
b) Cepstre

C'est la représentation de la transformée de Fourier du spectre ; soit deux fois la transformée de Fourier du signal temporel de base [5]. L'image obtenue est une courbe fonction du temps (qu'équence) mesuré en secondes. Le cepstre est au spectre ce que le spectre est à la représentation temporelle du signal.

Un phénomène périodique dans le temps n'est représenté que par un seul pic sur un spectre. De la même façon, un phénomène représenté par un spectre périodique (modulation) ne donne qu'un seul pic sur un cepstre. C'est un outil de diagnostic utilisé pour distinguer des défauts qui donnent des images spectrales complexes dues à plusieurs modulations d'amplitude simultanés.

NB : Le cepstre est un «spectre d'un spectre" et pour cette raison, le **cepstre** nom a été inventé à partir du **spectre** en inversant les premiers syllabes. D'autres termes sont inventés de façon similaire, **quefrequency** de la

frequency, rahmonic de harmonic, gamnitude de magnitude, saphe de la phase, alanalysis quefrequency partir de l'analyse de fréquence.



Équation 2-41 : (a) Spectre $f_1 = 50$ et $f_2 = 20$ (b) Cepstre

c) Zoom

Cette technique particulière va permettre de concentrer l'analyse fréquentielle sur une zone de fréquence où des précisions sur le contenu énergétique sont recherchées. Le traitement du signal sera un plus complexe que d'habitude de manière à présenter à l'algorithme FFT des échantillons représentatifs de la zone de fréquence d'intérêt. Sans rentrer dans les détails de ce traitement, le zoom FFT nécessitera d'observer plus longtemps le signal pour obtenir une meilleure précision fréquentielle.

C. Critère de sévérité

Etant donné que chaque machine est différente, il est impossible d'avoir des valeurs universelles et absolues des niveaux de sévérité. La quantification de ces seuils est très délicate et dépend de nombreux paramètres, tels que :

- Le montage (fondations, châssis, paliers ...)
- La tolérance du constructeur.
- Le vécu de la machine.

- Les besoins de l'utilisateur.

1. Les seuils

Il existe des guides qui proposent des valeurs globales efficaces de niveaux de vibration pour établir approximativement la sévérité des machines et pour aider et établir des niveaux d'alarmes et de pré alarme. (Voir annexe)

- Pour usage général : ISO 2372, VDI 2056, DIN 45665, BS 4675.
- Pour les machines de grande puissance ISO 3945
- En fonction du type de machines CDA/MS-/NVSH 107.

2. Courbes de tendance

Une approche économique mais efficace de la maintenance conditionnelle peut être faite par le suivi de tendance. Les mesures de tendance sont faites et enregistrées à intervalles réguliers et elles sont comparées à des niveaux d'alerte et d'alarme. Lorsque les niveaux d'alerte et d'alarme sont dépassés, une intervention est planifiée ou au besoin une analyse vibratoire plus approfondie est réalisée pour déterminer la cause du problème.

La méthodologie de la maintenance conditionnelle est basée sur :

- 1) Le choix d'un paramètre descriptif de l'évolution de défaut.
- 2) Suivre ce paramètre dans le temps à l'aide de la courbe de tendance.
- 3) Etablir des seuils de tolérance de variation de paramètre.
- 4) Etablir des seuils limites de variation (pré alarme et alarme).
- 5) Etablir le diagnostic de défaut.
- 6) Prédire la date de bris par extrapolation de courbes
- 7) Commander les pièces de rechanges
- 8) Déterminer la date d'entretien avant le bris.

Le tracé des courbes d'évolution des amplitudes vibratoires doit être complété par une comparaison des mesures à des seuils d'alarme et de danger.

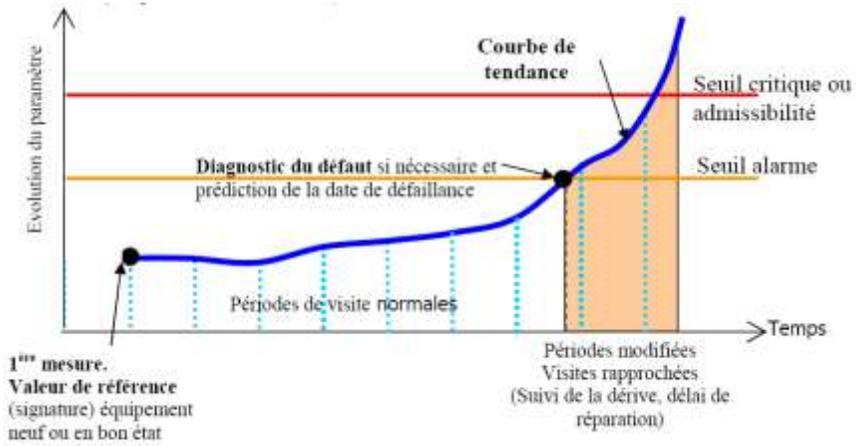
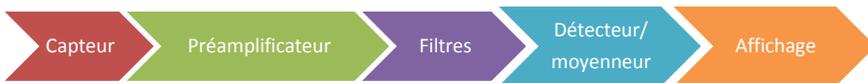
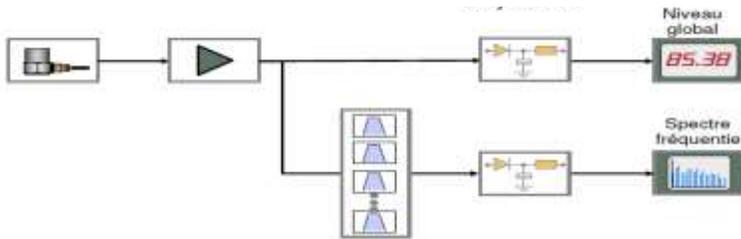


Figure 2-26 : Courbe de tendance

Chapitre 3. Acquisition et traitement des signaux

La chaîne de mesure doit remplir les fonctions suivantes

- Transformer la vibration mécanique en un signal électrique.
- Amplifier le signal pour le rendre exploitable.
- Transmettre le signal ou le mettre en mémoire.
- Analyser le signal
- Afficher le signal



A. Les capteurs de vibration

Un capteur de vibration est un transducteur capable de convertir en signal électrique le niveau de vibrations qu'il subit à un instant donné.

Il sera dit différentiel s'il mesure le mouvement dynamique relatif entre ses deux points d'attache : c'est typiquement le cas des capteurs inductifs à noyau plongeur, ou celui des vibromètres laser.

1. Capteur d'accélération (Accéléromètre)

Côté principes de mesure, les accéléromètres sont globalement divisés en quatre catégories. Les accéléromètres piézoélectriques,

piézorésistifs, capacitifs et asservis couvrent à eux quatre la grande majorité des applications.

Leur principe n'est pas si différent. Ces capteurs intègrent généralement une masse (dite "sismique") suspendue par un ressort. En mesurant la force à laquelle est soumise cette masse, on en déduit l'accélération (toujours par $F = M \times \gamma$).

Seul le principe de mesure de la force change d'une technologie à l'autre.

a) Les accéléromètres piézoélectriques

L'effet piézoélectrique est la propriété de certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et réciproquement (voir Figure 3-1).

Les capteurs piézoélectriques sont les premiers à avoir fait parler d'eux. Suivant le matériau piézoélectrique qu'ils emploient, tous les capteurs n'offrent pas les mêmes propriétés (notamment en termes de tenue à la température ou de niveau du signal de sortie). En règle générale, ce sont les capteurs qui offrent la gamme de température la plus large. Seuls les accéléromètres piézoélectriques permettent d'aller au-delà de 200 °C, et certains permettent même d'atteindre 760 °C.

Autre avantage, une échelle de mesure étendue (de 10^{-5} g à 10^5 g) et une gamme de fréquences relativement large (de 0,3 Hz à 40 kHz), ce qui leur permet de couvrir une grande variété d'applications : aussi bien pour caractériser le comportement d'équipements que pour des mesures basse fréquence (telles que le confort vibratoire) ou encore pour la mesure de chocs.

Avec tout de même quelques limitations. Les capteurs piézoélectriques ne permettent pas d'observer des fréquences très basses, et ils ne font pas passer la composante continue.

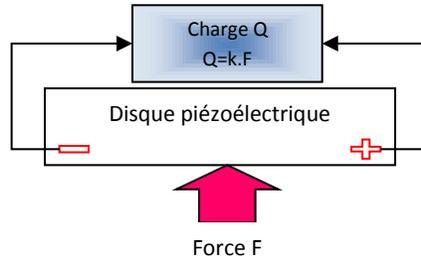


Figure 3-1 : Principe de l'effet piézoélectrique

Quelques matériaux piézoélectriques : Quartz, Céramiques polarisées, Topaze, Tourmaline, sucre,...

Le cœur du capteur est la tranche de matériaux piézoélectrique (habituellement une céramique ferro-électrique artificiellement polarisée) (voir Figure 3-2). Lorsque ce matériau subit une contrainte mécanique, en extension, compression ou cisaillement, il engendre une charge électrique proportionnelle à la force appliquée.

Cette charge est détectée par un amplificateur sensible aux charges et est convertie en signal de tension.

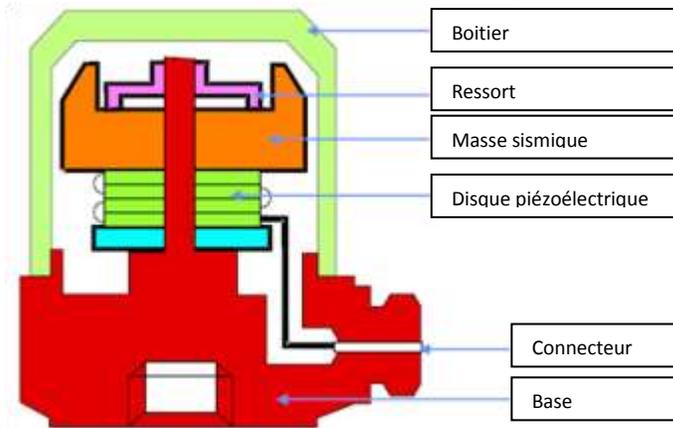


Figure 3-2 : Structure d'un accéléromètre à compression [14]

b) Caractéristique d'un accéléromètre

Le choix des accéléromètres est basé sur certains critères dont il faut faire un compromis.

(1) Gamme de fréquence utile

L'accéléromètre est constitué principalement d'une masse sismique M et d'un ressort précontraint de raideur K (voir Figure 3-2). De tels systèmes possèdent une fréquence f appelée fréquence naturelle, caractérisée par une crête importante (voir Figure 3-3). A cette fréquence l'élément sensible du capteur entre en résonance, et répond avec un déplacement maximum à une accélération donnée. La courbe montre que la réponse est suffisamment plate jusqu'à $1/3$ de la fréquence naturelle $f_0=1/3f$, l'intervalle (f_1-f_0) s'appelle gamme de fréquence utile. Elle doit bien sûr être la plus élevée possible, et largement supérieure aux fréquences dans lesquelles se fait la mesure. La gamme de fréquence est relativement étendue, de 0,5 Hz à 40 kHz. L'excitation de la fréquence de résonance du capteur suffit à l'endommager.

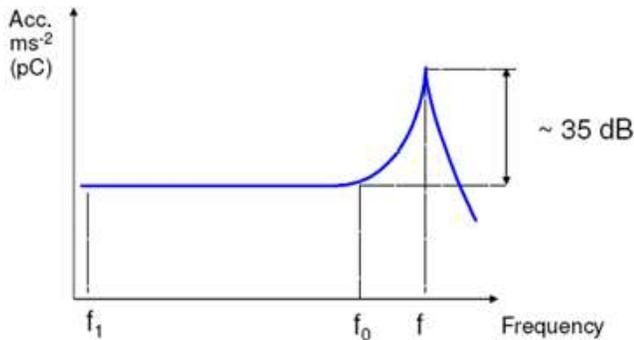


Figure 3-3 : Gamme de fréquence $f_1 - f_0$

(2) Sensibilité

C'est le rapport entre la tension de sortie et l'accélération (il s'exprime donc en mV/g pour un capteur à électronique intégrée). Idéalement, il doit être le plus élevé possible. Le capteur le plus sensible est aussi le plus encombrant. D'autre part, plus le capteur est sensible, plus sa fréquence de résonance est basse, donc plus son utilisation est limitée aux basses fréquences. Enfin, le choix est guidé par l'étendue de mesure : si elle est inférieure à 10 g, on choisira le plus souvent une sensibilité de 100 mV/g , et plutôt 10 mV/g pour un capteur de plus de 10 g.

(3) La masse

Pour ne pas influencer le phénomène qu'il est censé mesurer, le capteur doit être le plus léger possible. Mais plus un accéléromètre est léger, moins il est sensible. Il est aussi plus cher et plus fragile (notamment au niveau de la connectique). D'un autre côté, sa fréquence propre est plus élevée. En fait, tout dépend de la masse de la structure sur laquelle est fixé le capteur : un accéléromètre de 10 grammes est trop lourd pour mesurer les vibrations de composants montés sur des cartes électroniques, mais il n'a aucune influence sur les modes de vibrations d'une pompe ou d'une turbine de plusieurs tonnes. En général, il ne faut pas dépasser un rapport de 1 à 10 entre la masse du capteur et celle de la structure.

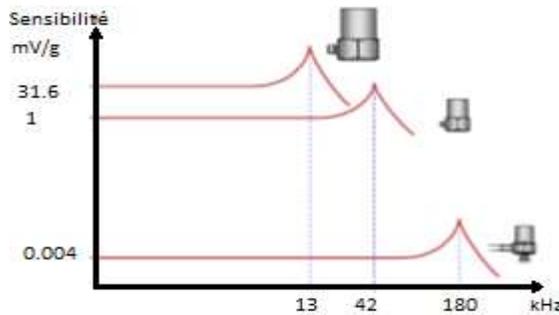


Figure 3-4 : Sensibilité vs. Bande passante [6]

(4) Gamme d'amplitude

Si l'unité d'accélération est le m/s^2 , la gamme de mesure s'exprime en multiples de l'accélération g ($g = 9,8 m/s^2$) due à la pesanteur (un capteur classique offre une étendue de mesure pouvant aller jusqu'à quelques centaines de g).

Tableau 3-1 : Caractéristiques usuelles des accéléromètres

	Classique	Spécifique
Gamme de fréquence	0,2 Hz à 25 kHz	
Sensibilité	10 à 1000 mV/g	1 à 10 V/g (séismique)
Masse	5 à 40 g	200 g (séismique)
Gamme d'amplitude	500 g crête	100000 g (choc)

c) Montage des accéléromètres

Une fois l'accéléromètre choisi, il faut encore prendre un certain nombre de précautions pour que les mesures soient correctes. Parmi elles, le montage du capteur. Rien ne sert d'avoir un excellent capteur s'il n'est pas bien monté, c'est-à-dire parfaitement solidaire de la structure à tester. Sinon, il risque de vibrer lui-même sur la structure et de fausser les mesures.

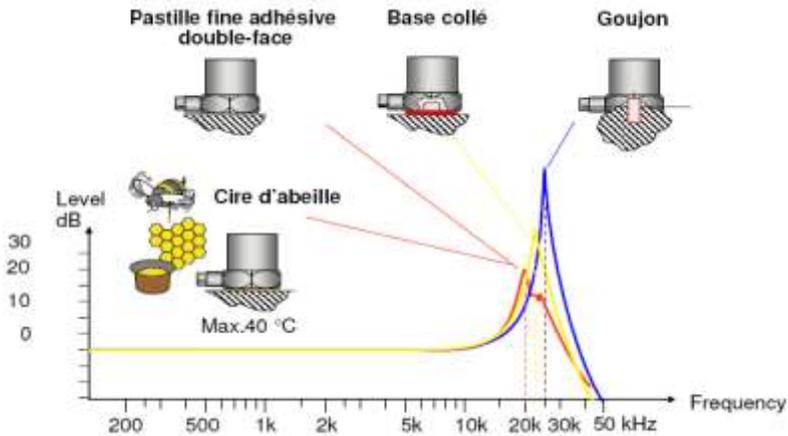


Figure 3-5 : Montage des capteurs vs gamme de fréquence utile (1) [14]

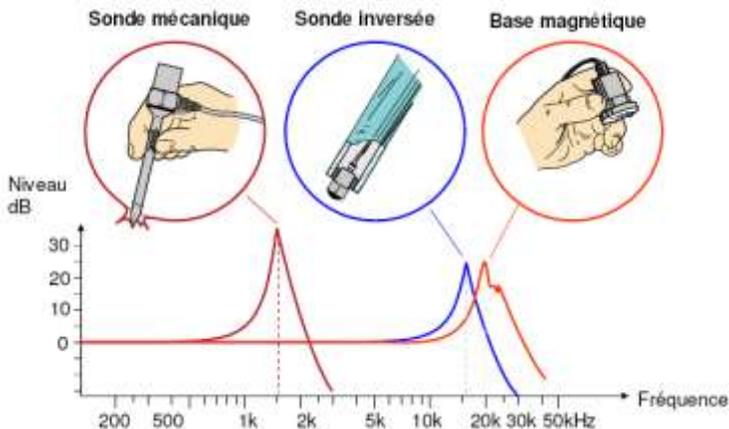


Figure 3-6 : Montage des capteurs vs gamme de fréquence (2) [14]

2. Capteur de vitesse (Vélocimètre)

Les vélocimètres sont des capteurs électrodynamiques, auto-générateur d'une tension proportionnelle à la vitesse de déplacement de la bobine.

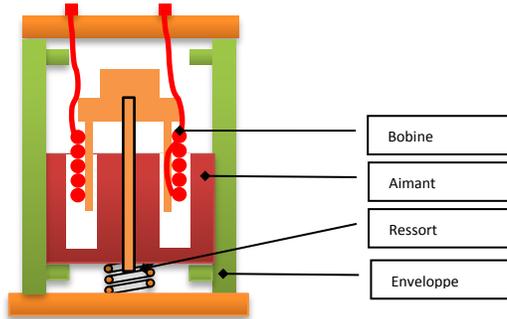


Figure 3-7 : Structure d'un vélocimètre [14]

Le mouvement de la pièce métallique contenant les spires, provoque une variation du flux magnétique, donc une induction de courant dans la bobine.

$$U(t) = -n \times \frac{d\Phi}{dt} = -n \times \frac{d\Phi}{dX} \times \frac{dX}{dt} \quad \text{Équation 3-1}$$

Avec Φ : Flux magnétique ; $X(t)$: Déplacement de la masse ; n : Le nombre de spire de la bobine ; $\frac{dX}{dt}$: Vitesse de déplacement de la masse.

Donc la tension aux bornes de la bobine est proportionnelle à la vitesse de déplacement.

3. Capteur de déplacement (Proximètre)

Les capteurs de proximité sont caractérisés par l'absence de liaison mécanique entre le dispositif de mesure et l'objet cible. L'interaction entre ces derniers est réalisé par l'intermédiaire d'un champ (magnétique, électrique, électromagnétique).

Ces capteurs permettent la mesure du déplacement relatif ou de la position d'un arbre.

Le capteur le mieux adapté à la mesure et à l'analyse du déplacement relatif d'un arbre dans son palier est le capteur à courant de Foucault.

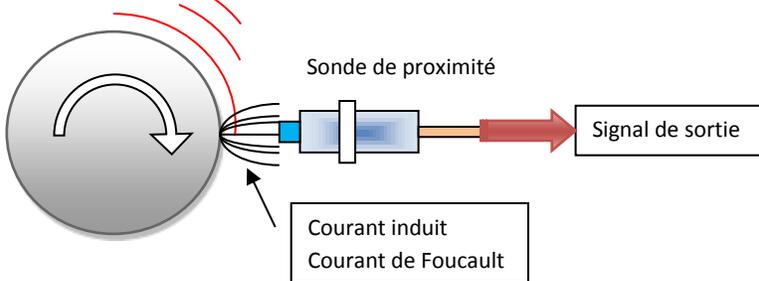


Figure 3-8 : Principe d'un Capteur à courant de Foucault

Même s'ils sont plus souvent utilisés pour mesurer des déplacements, les capteurs à courants de Foucault peuvent mesurer des phénomènes vibratoires à des fréquences allant jusqu'à 10 kHz (ils sont par exemple employés pour la surveillance d'arbres dans les machines tournantes). Par contre, leur montage est parfois problématique (ils doivent être montés sur une structure isolée de l'élément à contrôler), la surface qui vibre doit être électriquement conductrice, et leur coût (électronique comprise) est plus élevé que celui d'un accéléromètre "classique".

a) Principe d'un capteur de proximité

Le pont d'impédances est alimenté par un oscillateur (> 100 KHz). La partie variable du pont est constituée d'une self.

Si le pont est équilibré, il n'y a pas de tension aux bornes du démodulateur. Dès qu'il y a une modification de l'impédance de la bobine (variation de l'entrefer entre la cible et le noyau), il y a un déséquilibre du pont, donc une tension aux bornes du démodulateur à la fréquence de l'oscillateur. La tension aux bornes du démodulateur est proportionnelle à la distance entre la cible et la bobine.

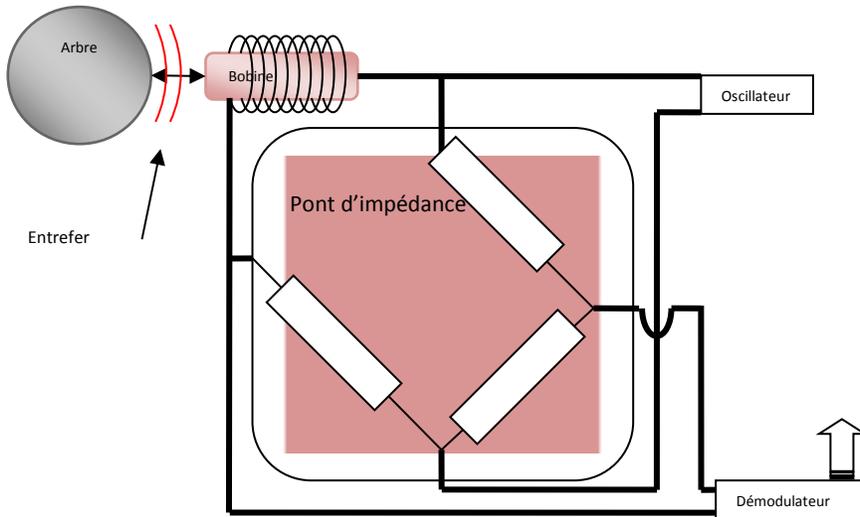


Figure 3-9: Structure d'un capteur de proximité

Le capteur mesure la distance entre l'extrémité de la sonde et la cible, la mesure peut être du type statique (GAP DC) ou dynamique (Vibration AC).

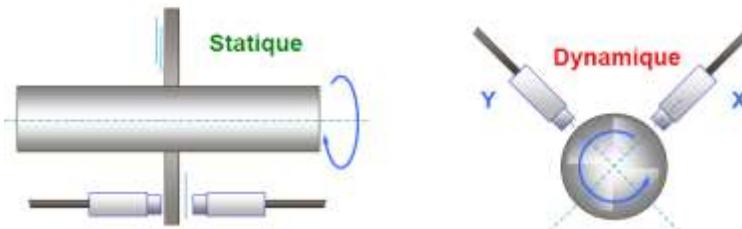


Figure 3-10 : Mesure statique (GAP) et dynamique (Vibration)

b) Caractéristiques

Les capteurs de proximité sont choisis selon les caractéristiques suivantes :

- Plage de fonctionnement
- Sensibilité
- Bande passante

Un exemple de caractéristique est donné par le Tableau 3-2.

a) Fixation des capteurs de proximité

La fixation des capteurs de proximité est conditionnée par le respect de la plage de fonctionnement entre le capteur et la cible.

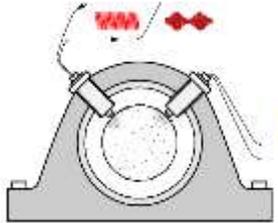


Figure 3-11 : Fixation des capteurs de proximité

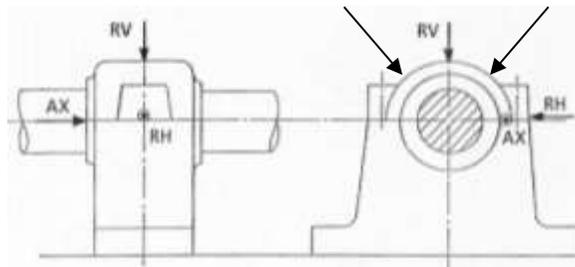
4. Points de mesure

L'emplacement des capteurs est généralement dicté par la nature du défaut recherché et la raison pour laquelle on fait la mesure. La direction de mesure peut être perpendiculairement à l'axe on dit qu'elle est radial vertical, radial horizontal ou radial oblique. Le capteur peut aussi être placé parallèlement à l'axe de rotation et on dit qu'il est axial.

Tableau 3-2 : Exemple des caractéristiques des capteurs de déplacement

Mesure				
Type	Capteur de déplacement inductif sans contact			
Plage de fonctionnement	0 à 2 mm	0 à 5 mm	0 à 8.5 mm	0 à 12 mm
Sensibilité (acier)	8.0 mV/ μm	3.6 mV/ μm	2.0 mV/ μm	1.4 mV/ μm
Bande passante	0 – 10 000 Hz			
Linéarité	1%			
Étanchéité	IP 65			
Sensibilité température	Capteur : < 5% à 150°C			
Mécanique				
Diamètre	Filetage M8	Filetage M16	Filetage M24	Filetage M30
Longueur	37 mm	62 mm	75 mm	99 mm
Câble	RG 179 PTFE – Standard 0.5 m (maxi 9 m)			
Température capteur	-30°C à +180 °C			
Matière capteur	Acier inoxydable			

CONDITIONNEURS	ECPD	ECPD+24V	ECPD/78	ECPD/60	ECPD/85	ECPD2AC	ECPD2DC
Alimentation	-24VDC	+24VDC	+24VDC	+24VDC	+24VDC	+24VDC	+24VDC
Type mesure	Vib+Gap	Vib+Gap	Vib+Gap	Vib	Gap	Vib	Gap
Tension de sortie	0 / -16V	0 / +16V	0 / +10V	0 / +16 V 4-20mA			
Bande passante	0-10 kHz	0-10 kHz	0-10 kHz	5Hz-5 kHz	0-5 kHz	5Hz-1 kHz	0-1 kHz
Impédance de sortie	< 50 W						
Dimensions	80 mm x 75 mm x 66 mm						
Température	< 5% à 80°C						
Poids	450 gr						



RV : Radial Vertical ; RH : Radial Horizontal ; AX : AXial ; RO : Radial Oblique

Figure 3-12 : Exemple de points de mesure

Dans la pratique il faut prévoir soit des trous taraudés pour la fixation des capteurs par goujons, ou des pastilles qui seront collées sur la partie fixe de la machine.

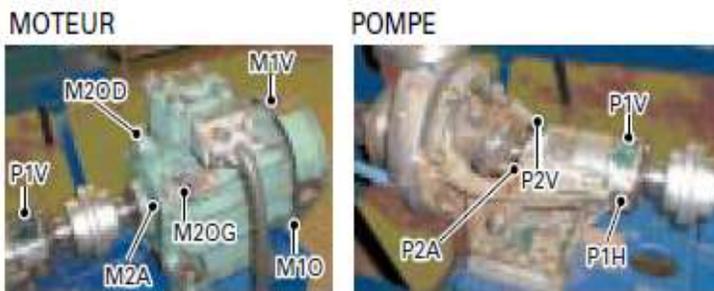


Figure 3-13 : Point de mesure pratique pour un moteur et une pompe

B. Mesures tachymétriques

1. Tachymètres à photoréflexion

Dans un tachymètre à photoréflexion, le capteur est constitué d'un émetteur et d'un récepteur photoélectriques. Pour effectuer une mesure, il suffit de coller une cible réfléchissante sur l'objet dont on veut mesurer la vitesse de rotation puis d'orienter le faisceau du tachymètre en direction de cet objet. Le capteur photoélectrique génère alors une impulsion à chaque fois que la cible réfléchissante passe devant le faisceau lumineux.

C. Traitement des signaux

1. Le conditionnement

Le conditionneur doit permettre de préparer le signal à un traitement. Il doit amplifier et convertir le signal électrique de sortie de capteur.

a) Amplification

Le signal fourni par un capteur est pratiquement très faible et ne peut donc être transmis tel qu'il est. On doit donc dans une première étape l'amplifier pour l'adapter en amplitude aux dispositifs suivants de la chaîne d'acquisition. En exploitant les propriétés de l'amplificateur opérationnel on pourra aussi compenser des erreurs de zéro en procédant à un décalage du signal, voire parfois décaler fortement le signal pour le rendre compatible avec le système de conversion analogique numérique associé. Précisons que le taux d'amplification requis sera le résultat d'un compromis lié au choix du convertisseur analogique numérique, c'est à dire en fait de la résolution souhaitée. Celle-ci doit être murement réfléchie et résulte de plusieurs critères, dont en particulier le choix du système informatique et du langage dans lequel on va développer les programmes de traitement

éventuel, ainsi que du procédé d'affichage retenu autant que de la qualité du capteur. On devra aussi tenir compte de l'étendue de mesure effective.

b) Conversion Analogique-Numérique (CAN)

Le signal peut être analogique ou numérique. Il est souvent nécessaire d'utiliser un signal numérique. Il faut alors utiliser un convertisseur analogique numérique. Le stockage peut se faire avec des données numériques ou analogiques.

Les données numériques présentent l'avantage de la robustesse en termes de signal électrique (au cours du transport ou du stockage) puisqu'il suffit de déterminer si on a affaire à un 1 ou un 0. La numérisation permet d'appliquer aux données de nombreux algorithmes, en particulier ceux de compression en vue de diminuer les temps de transfert et les volumes de stockage. Deux caractéristiques classent ces algorithmes : le temps réel et la perte d'informations. Il y a bien évidemment toujours un compromis entre la réduction du volume des informations (compression) et leur sûreté (redondance).

La numérisation suppose que le signal analogique soit sous forme électrique, une tension la plupart du temps. Si la grandeur que le signal doit représenter n'est pas électrique, il faut faire appel à un capteur (et sa chaîne de mesure) qui assurera sa conversion.

2. Echantillonnage (Numérisation)

En pratique le signal physique n'est pas étudié en totalité. En fait, seule la représentation numérique du signal est utilisée pour réaliser les calculs voulus. La numérisation du signal est une transformation discrète du signal physique considéré comme continu dans le sens mathématique du terme.

La transformée de Fourier exige que l'on connaisse la fonction $X(t)$. Or lorsqu'on effectue une mesure, on ne sait pas qu'elle est la formulation mathématique de la fonction mais l'on dispose des valeurs discrètes de cette fonction, valeurs évaluées à certains intervalles de temps pendant un

certain laps de temps. C'est ce que nous qualifions d'opération d'échantillonnage.

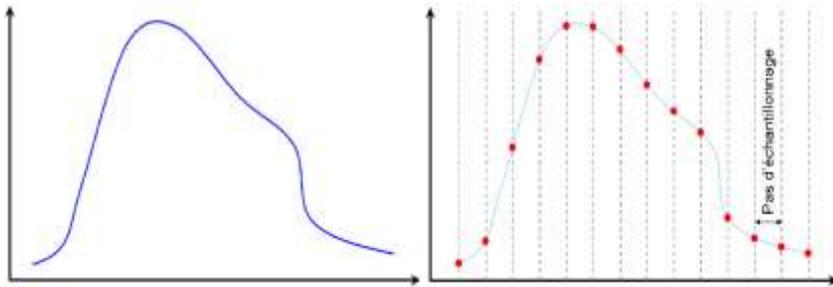


Figure 3-14: Principe de l'échantillonnage

Ainsi échantillonner revient à sélectionner, à des instants différents, certaines valeurs du signal continu. L'opération d'échantillonnage est accomplie périodiquement sur le signal temporel à une période annotée T_e

a) *Phénomène de recouvrement*

Pour ne pas perdre d'information la période d'échantillonnage doit être suffisamment petite par rapport à la période du signal recherché. Lorsque cette période d'échantillonnage est trop grande par rapport à la période du signal recherché, on voit alors apparaître un signal apparent. Or en général, on ne connaît pas toutes les fréquences recherchées et de ce fait, il est inévitable que ce phénomène se manifeste aux hautes fréquences si nous ne filtrons pas le signal. On appelle ce phénomène recouvrement (repliement) (aliasing en anglais).

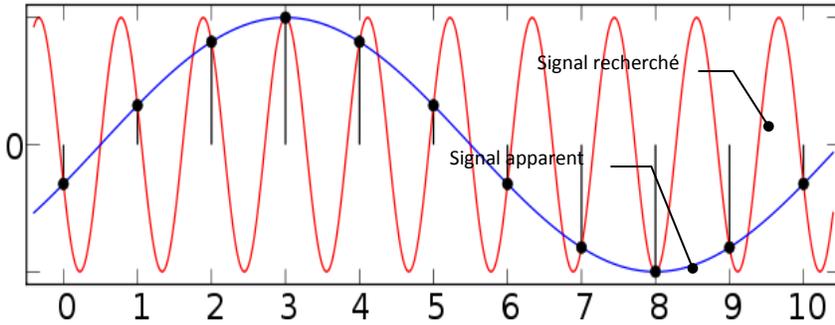


Figure 3-15: Phénomène de recouvrement lié à l'échantillonnage

b) Théorème Shannon

Pour éviter l'apparition de ces fréquences de repliement, il faut respecter le principe du théorème de Shannon disant qu'il faut au moins 2 échantillons sur une période pour décrire un signal sinusoïdal.

Le théorème de **SHANNON** montre que la reconstitution correcte d'un signal nécessite que la fréquence d'échantillonnage f_e soit au moins deux fois plus grande que la plus grande des fréquences f_{\max} du spectre du signal $f_e > 2f_{\max}$.

En pratique on se fixe une fréquence maximale f_{\max} à partir de laquelle on estime la représentation de notre signal satisfaisante pour les applications que l'on veut en faire. Puis on effectue un filtrage passe-bas (à f_{\max}) avant l'échantillonnage afin de remédier aux repliements de spectre. On appelle ce filtre un filtre anti-repliement (anti-aliasing).

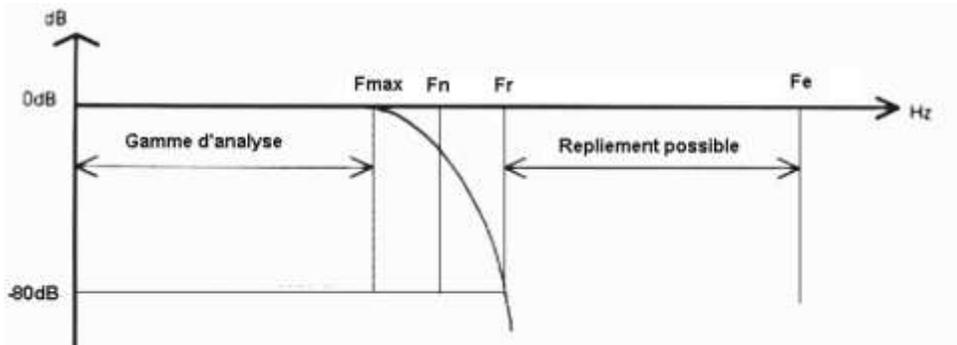


Figure 3-16: Filtre anti-repliement

3. Analyseur de fréquence

Un analyseur de spectre est un instrument de mesure destiné à afficher les différentes fréquences contenues dans un signal ainsi que leurs amplitudes respectives.

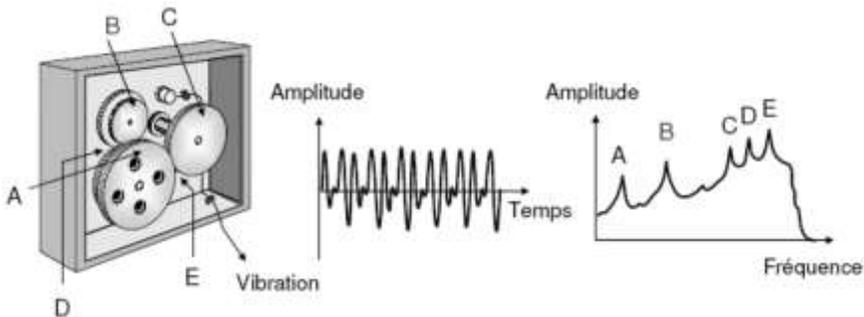


Figure 3-17 : Analyse en fréquence [6]

a) Transformé discrète de Fourier

Etant donné que les fonction temporelles sont causales et numérisées avec une période d'échantillonnage T_e , la transformée de Fourier sera évaluée pour chacune des valeurs de ω , en remplaçant l'intégrale par une somme[4].

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) \times e^{-i\omega t} dt \quad \text{Équation 3-2}$$

Remplacé par

$$X(\omega) = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} X(k \times T_e) \times e^{-i\omega k T_e} \quad \text{Équation 3-3}$$

Si on pose : $\omega = n \times \Delta\omega$
 $n = 0, \dots, N-1$: représente le numéro de la ligne fréquentielle

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{(N \times T_e)} \quad \text{: représente la résolution fréquentielle}$$

N : est le nombre d'échantillons

k : est le numéro de l'échantillon

$$\Delta t = T_e$$

$$t = k \times T_e$$

On obtient :

$$X(k \times \Delta\omega) = T_e \sum_{k=0}^{N-1} X(k \times T_e) \times e^{\frac{-2\pi i n k}{N}} \quad \text{Équation 3-4}$$

pour $n = 0, 1, \dots, N-1$

a) Affichage du spectre

La représentation graphique des phénomènes vibratoires ainsi que de leur évolution, dans le temps permet, contrairement aux chiffres, une vue rapide et efficace du résultat.

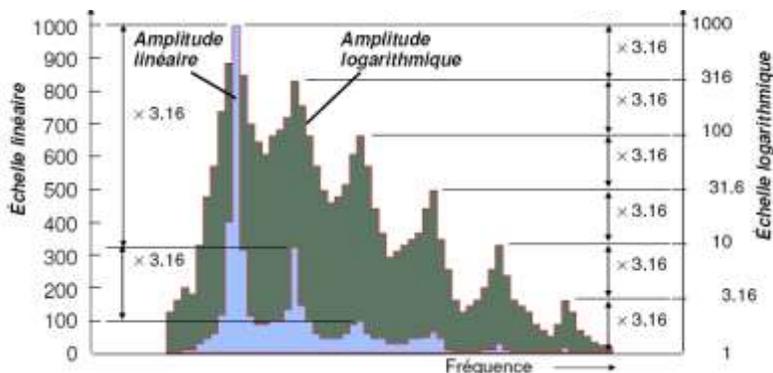


Figure 3-18: Echelle d'amplitude Linéaire vs Logarithmique

En analyse spectrale on peut utiliser deux échelles : le linéaire et le logarithmique. Ce dernier permet de représenter sur un même graphe des écarts d'amplitudes très grandes.

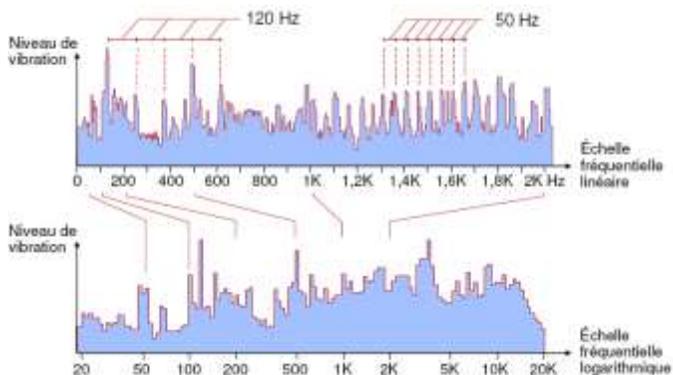


Figure 3-19 : Echelle fréquentielle linéaire vs logarithmique

4. Fenêtrage

Les échantillons livrés par le CAN sont numérisés en bloc, ensuite dirigés vers le circuit de calcul de la FFT.

Le traitement commence par le remplissage d'une mémoire de taille donnée (généralement une puissance de 2. Par exemple, un bloc de $N = 1024 = 2^{10}$ échantillons temporels) qui sera la base temporelle d'analyse. Ces N échantillons temporels sont ensuite traités dans un

algorithme de calcul FFT. Ce circuit spécialisé (matériel + logiciel) calcule en fait une transformée de FOURIER rapide (Fast Fourier Transform) qui est un processus optimisé en fonction du matériel utilisé, du nombre d'échantillons temporel dans le bloc, du type et du nombre de mémoires en présence, etc.

En effet, le signal que l'on cherche à mesurer est un signal physique, réel, non prédictible. Il est à priori non périodique, et même s'il l'était, sa période ne serait pas celle définie par la fréquence d'échantillonnage que nous avons choisi (en fait de période $\frac{N}{f_e}$ = longueur du bloc temporel; avec N = nombre de points dans le bloc de calcul et f_e = fréquence d'échantillonnage).

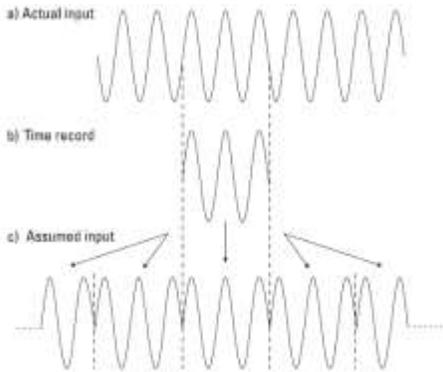


Figure 3-20: Périodisation artificielle [9]

Cette périodisation artificielle crée des discontinuités dans le signal temporel. En fait, on vient d'observer notre signal avec une fenêtre rectangulaire, c'est à dire que l'on a ouvert les yeux de l'analyseur à un moment donné dans la vie du signal, que ses yeux sont restés ouverts pendant la durée d'observation et que brutalement, ils se sont refermés à la fin de l'observation. L'analyseur a taillé dans le vif le signal. Il n'a respecté aucune périodicité.

En vue de réduire cette perturbation, nous pouvons avoir recours à différentes formes de fenêtres permettant de pondérer le signal : Hanning, Flat top, Hamming, Kaiser-Bessel

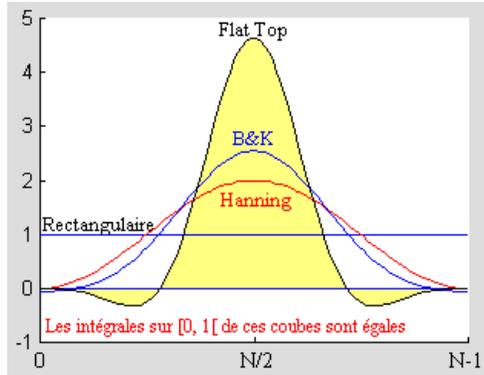


Figure 3-21 : Différentes formes de fenêtrage

Le tableau suivant montre les caractéristiques essentielles de chaque fenêtre temporelle couramment utilisée.

Tableau 3-3 : Caractéristiques des fenêtres temporelles

Fenêtre	Bruit	Erreur max	Utilisation
Rectangulaire	1	3.9	Tout le signal entre dans le bloc temporel
Hanning	1.5	1.4	Signal pseudo-stationnaire
Hamming	1.36	1.8	Meilleure résolution en fréquence
Kaiser-Bessel	1.8	1.0	Meilleure résolution en amplitude
Flat-top	3.77	0.01	Etalonnage

5. Moyennage

Le calcul de la FFT fournit un "spectre instantané". Ce dernier ne représente qu'une partie de la vie énergétique du signal en fonction de la fréquence.

En pratique, un moyennage sur les spectres instantanés est effectué pour obtenir un "auto spectre". En fait, on regarde le signal plus longtemps (comme le disait FOURIER) et l'estimation de l'énergie s'en trouve améliorée.

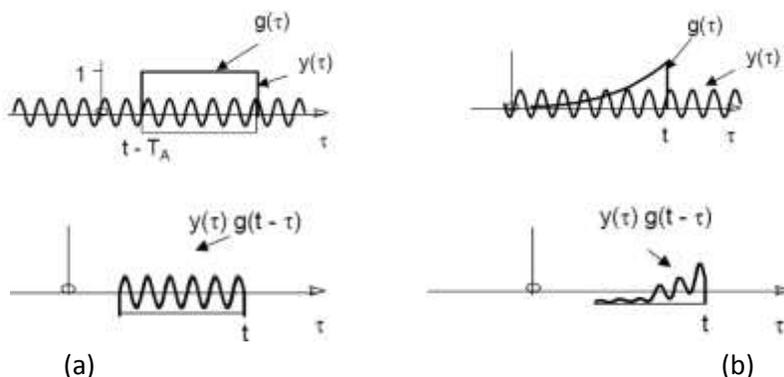


Figure 3-22 : Moyennage (a) Linéaire (b) exponentiel

- Moyennage linéaire

Chaque spectre instantané est compté avec un poids identique dans la moyenne. Le résultat est le niveau énergétique total contenu dans chaque bande d'analyse (raie FFT) pendant la durée de mesure.

- Moyennage exponentiel

Le dernier spectre instantané entré a un poids équivalent aux n premiers spectres instantanés mesurés. Il s'agit en fait d'une moyenne glissante dont le lissage est assuré par le nombre de moyennes choisies.

6. Filtrage

Un filtre idéal présente:

- un affaiblissement nul dans la bande de fréquence que l'on désire conserver (Bande passante)
- un affaiblissement infini dans la bande que l'on désire éliminer (Bande atténuée)
- Filtre passe-haut : C'est un filtre qui laisse passer les hautes fréquences et qui atténue les basses fréquences, c'est-à-dire les fréquences inférieures à la fréquence de coupure.
- Filtre passe-bande : Permet de passer seulement les fréquences entre les deux fréquences de coupure ;

- **Filtre coupe-bande** : Le filtre à rejet (ou filtre coupe-bande) laisse passer tout sauf ce qui est entre les deux fréquences de coupure.

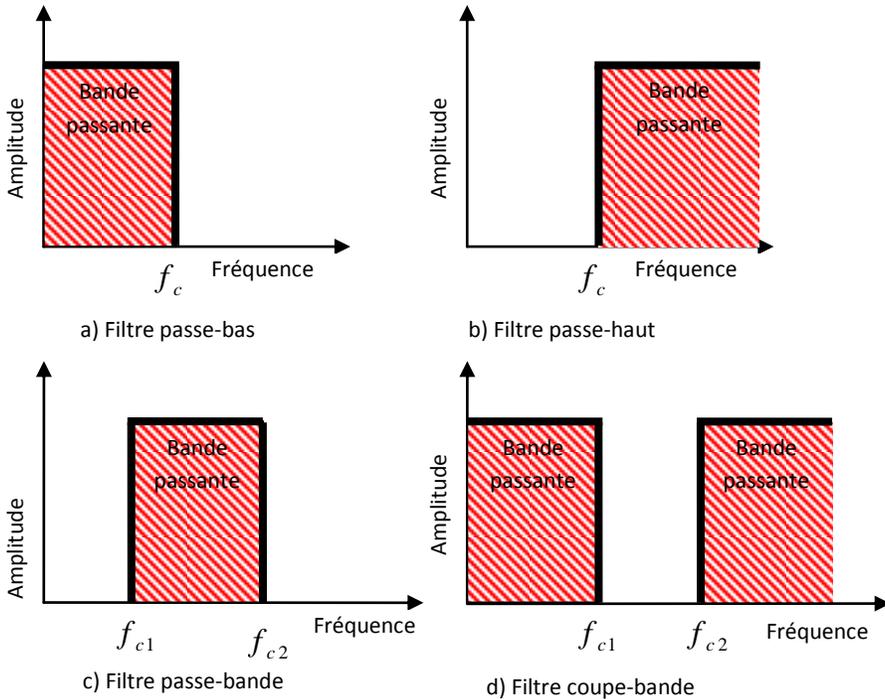


Figure 3-23: Classification des filtres

Filtre passe-bas : C'est un dispositif qui démontre une réponse en fréquence relativement constante aux basses fréquences et un gain décroissant aux fréquences supérieures à la fréquence de coupure. La décroissance plus ou moins rapide dépend de l'ordre du filtre. On utilise les filtres passe-bas pour réduire l'amplitude des composantes de fréquences supérieurs à la celle de coupure.

Chapitre 4. Signatures Vibratoires des Défauts Mécaniques

Le présent chapitre donne un aperçu sur les principaux défauts ainsi que leurs manifestations vibratoires que l'on peut rencontrer sur les machines tournantes classiques.

A. Balourd

1. Introduction

Le balourd est une force tournante, générée par un déséquilibre de la masse tournante du rotor.

Supposons un rotor parfaitement en équilibre. Ajoutons en un endroit de ce rotor une masse M . Le rotor présentera un déséquilibre même à l'arrêt, le rotor reviendra à une position d'équilibre. Il s'agit d'un balourd statique.

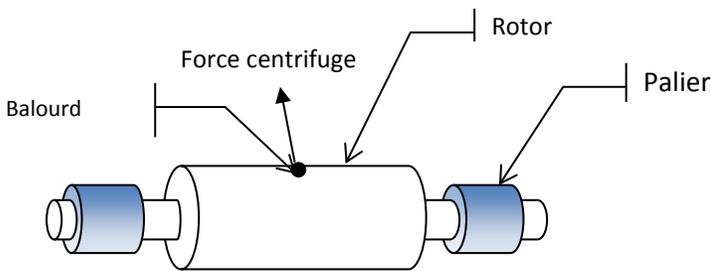


Figure 4-1 : Défaut de balourd dans un rotor

R étant le rayon du rotor, Ω désigne la vitesse angulaire du rotor.

La vitesse de la masse M (voir Figure 4-2), par rapport à un repère fixe R_0 est :

$$\vec{V}(M / R_0) = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} / R_0 = R \times \Omega \cdot \vec{u}_\theta$$

Équation 4-1

L'accélération dû à la rotation de la masse est exprimée par :

$$\vec{\gamma}(M / R_0) = \frac{d\vec{V}}{dt} / R_0 = -R \times \Omega^2 \cdot \vec{u}_r \quad \text{Équation 4-2}$$

La masse étant en équilibre d'où la somme des forces est nulle, ce qui donne :

$$\vec{F} + M\vec{\gamma} = \vec{0} \quad \text{Équation 4-3}$$

D'où :

$$\|\vec{F}\| = M \times R \times \Omega^2 \quad \text{Équation 4-4}$$

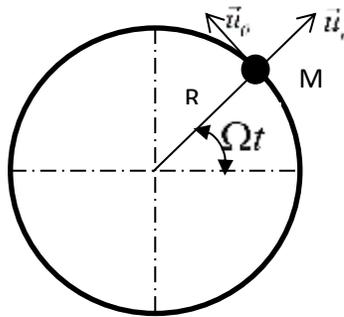


Figure 4-2 : Force centrifuge exercée par la masse

Donc dès que le rotor sera en rotation, la masse M exercera une force radiale dont le module est proportionnel à la vitesse de rotation selon la relation :

2. Origine de balourd

Le balourd peut avoir principalement deux causes :

- Le balourd de conception, résulte de défauts dus à l'hétérogénéité, l'anisotropie de la matière, l'usinage et le montage.

- Le balourd accidentel, conséquence d'une modification de l'inertie (arrachement ou dépôt de matière), ou d'une éventuelle modification géométrique (déformation plastique ou thermique).

3. Types de balourd

Un rotor est parfaitement équilibré si son axe principal d'inertie Δ est confondu avec son axe de rotation Z. Suivant la répartition du balourd le long du ressort on distingue quatre types :

a) Balourd statique

C'est l'état où l'axe central d'inertie Δ est uniquement déplacé parallèlement à l'axe de rotation de l'arbre Z.

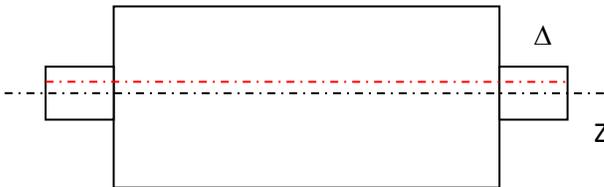


Figure 4-3 : Balourd statique

b) Balourd de couple

C'est l'état où l'axe central d'inertie (Δ) coupe l'axe de rotation au centre de gravité.

Le centre de gravité est situé sur l'axe de rotation ; l'équilibre statique est réalisé.

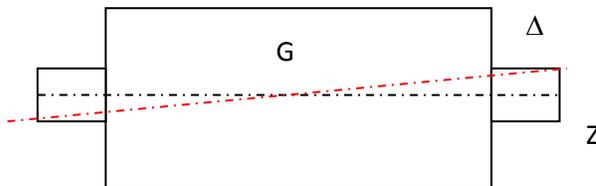


Figure 4-4 : Balourd de couple

c) *Balourd quasi-statique*

C'est l'état où l'axe central d'inertie (Δ) coupe l'axe de l'arbre en un point G' autre que le centre de gravité.

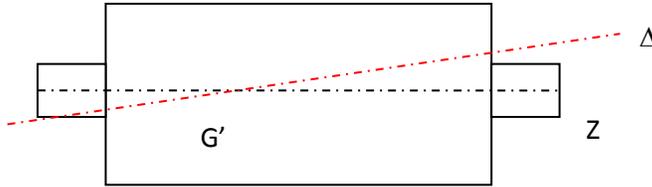


Figure 4-5 : Balourd quasi-statique

Ce cas cumule le déséquilibre statique et le déséquilibre de couple.

d) *Balourd dynamique*

C'est l'état tel que l'axe central d'inertie (Δ) et l'axe de rotation (Z) de l'arbre ne sont pas coplanaires.

Cette dernière configuration permet de schématiser le déséquilibre le plus général.

4. Réponse temporelle et spectrale

La force centrifuge exercée par le balourd est transmise aux paliers P1 et P2 telle que $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$. La projection des forces sur les axes horizontal et vertical donne $F_{1V} = F_1 \cos(\Omega t)$ et $F_{1H} = F_1 \sin(\Omega t)$

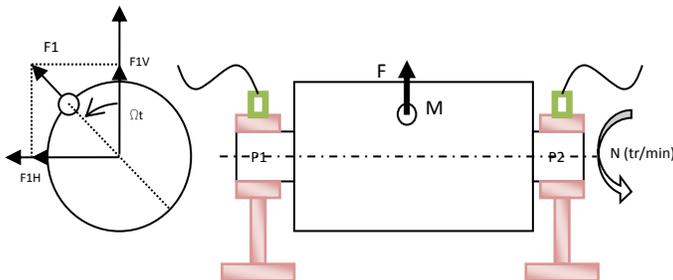


Figure 4-6 : Action sur les paliers par la Force centrifuge d'un balourd

La mesure des vibrations par des capteurs fixés sur les paliers P1 et P2 dans les directions horizontales et verticales montre des signaux sinusoïdaux simples illustrés sur la Figure 4-7.

C'est un signal sinusoïdal de période : $T_0 = \frac{1}{f_0}$ avec $f_0 = \frac{N}{60}$. N étant la vitesse de rotation du rotor en RPM.

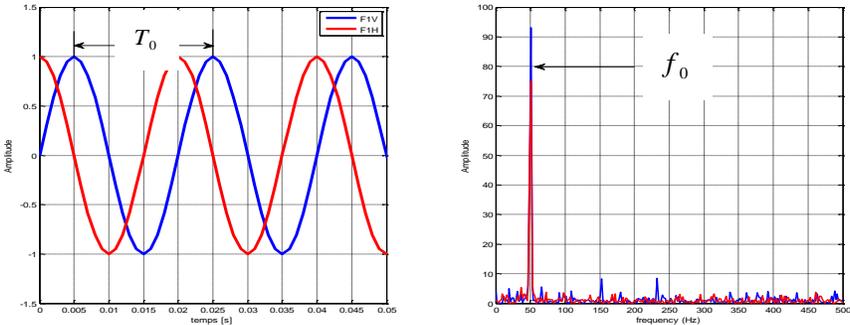


Figure 4-7 : Signature d'un défaut de balourd

L'analyse spectrale de ce type de balourd présentera le spectre caractérisé par la présence d'un pic à la fréquence de rotation du rotor.

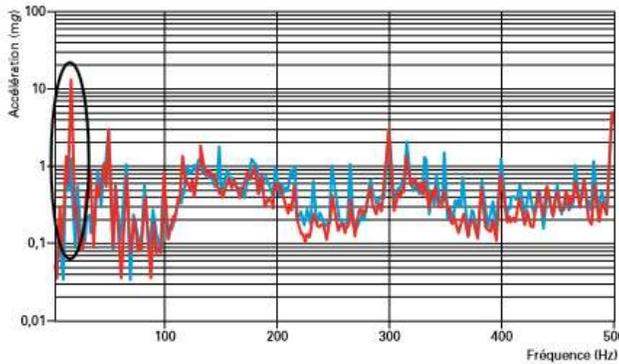


Figure 4-8 : Mise en évidence d'un défaut de balourd [5]

Un balourd élevé exerce une force sur les paliers susceptible d'accélérer leur dégradation. Ces vibrations peuvent être gênantes à plusieurs titres :

- Transmission des vibrations vers des machines proches ;
- Transmission vers des locaux proche (problème de confort) ;

- Bruit généré (problème de discrétion acoustique).

B. Défauts de fixation

Les défauts de fixation sont en générale résultat d'un desserrage des organes d'assemblage tels que boulon ou vis de fixation, ou un manque de rigidité de montage sur une structure.

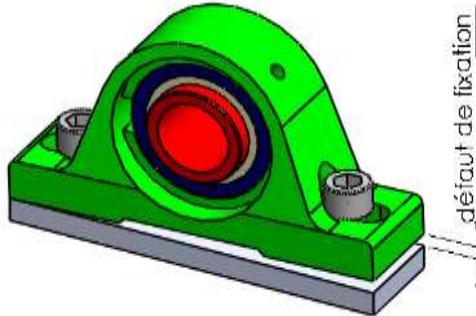


Figure 4-9 : Défaut de fixation

En général, le desserrage se traduit par un signal temporel irrégulier. La force excitante qui cause la vibration peut être un balourd sur la partie tournante, mais la réponse non linéaire de la structure donne un signal temporel irrégulier et synchrone.

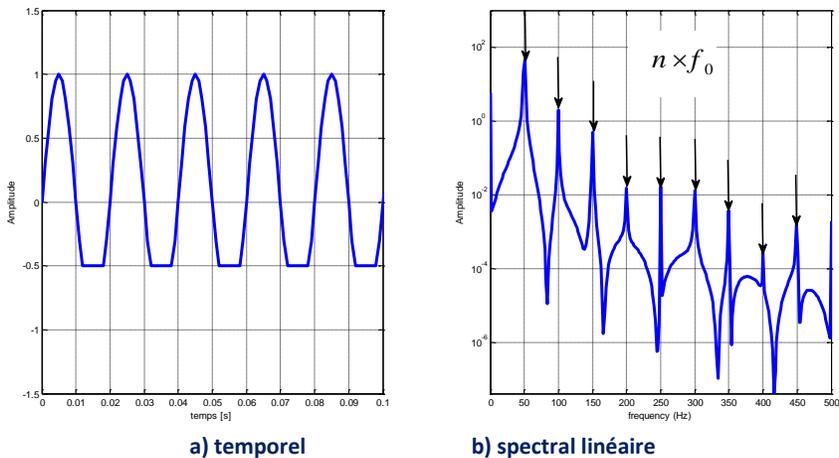


Figure 4-10 : Signature d'un défaut de fixation

La réponse temporelle du signal est donnée par la Figure 4-10 a) qui est un signal sinusoïdal échantillonné dû à l'impact du système sur son support.

La transformée de Fourier de ce signal fait introduire plusieurs harmoniques de la fréquence du signal de base qui est en général la fréquence de rotation de l'arbre.

$$A(t) = \sum_i A_i(t) \text{ avec } A_i(t) = A_{i0} \sin(i \times \Omega t) \text{ ou } i = 1 \dots n$$

Par conséquent le spectre présente des pics multiples de la fréquence de rotation Ω et au-delà de 5x (voir Figure 4-10 b).

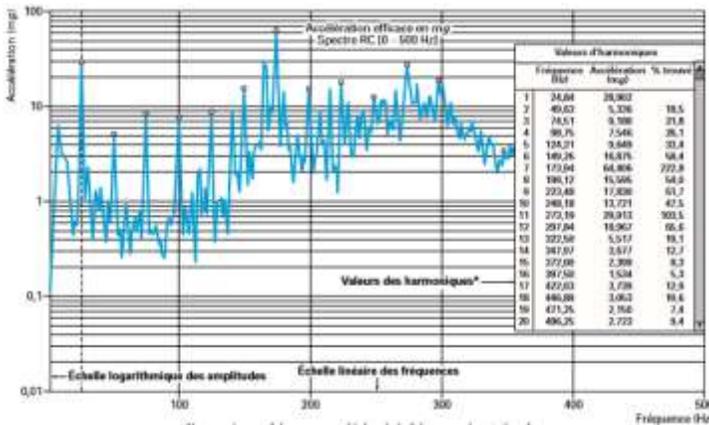


Figure 4-11 : Mise en évidence d'un défaut de fixation [5]

C. Jeu de palier

Les vibrations des paliers lisses proviennent du jeu excessif dans le palier causé soit par :

- Le frottement et par suite une usure des paliers.
- L'érosion chimique.

Le phénomène de tourbillonnement se produit lorsque le rotor qui tourne autour de son axe à sa vitesse de rotation Ω_0 , se met à tourner dans le palier à une vitesse Ω_{tb} autour de l'axe du palier. Ce phénomène est facilement identifiable puisqu'il apparaît à la fréquence de

tourbillonnement Ω_{tb} qui est théoriquement la moitié de la vitesse de rotation Ω_0 .

La vitesse de glissement du point M est exprimée par $\vec{V}(M \in S_1/S_0) = \vec{0}$ avec :

$$\vec{V}(M \in S_1/S_0) = \vec{V}(M \in S_1/R_0) - \vec{V}(M \in S_0/R_0) \quad \text{Équation 4-5}$$

Déterminant l'expression de chaque terme.

$$\vec{V}(M \in S_1/R_0) = \vec{V}(O_1 \in S_1/R_0) + \vec{\Omega}_{S_1/R_0} \wedge \overline{O_1M} \quad \text{Équation 4-6}$$

Avec :

$$\vec{V}(O_1 \in S_1/R_0) = \overline{OO_1} \times \Omega_{tb} \vec{Y}_1 \quad \text{Équation 4-7}$$

$$\vec{\Omega}_{S_1/R_0} = (\Omega_0 - \Omega_{tb}) \cdot \vec{Z}_1 \quad \text{Équation 4-8}$$

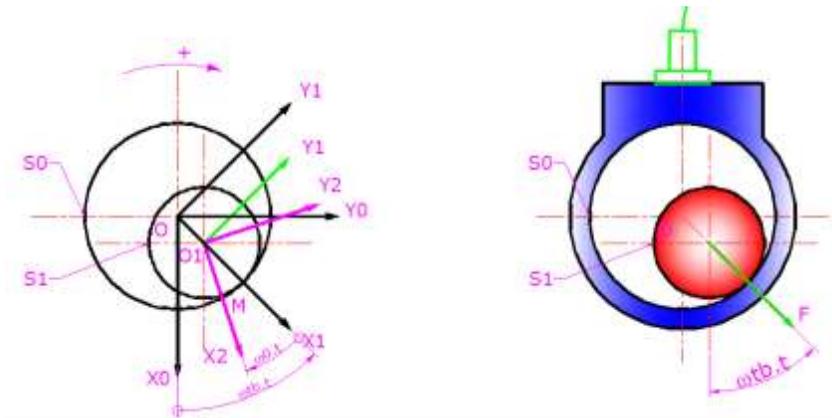


Figure 4-12 : Phénomène de tourbillonnement

Donc :

$$\begin{cases} \vec{V}(M \in S_1 / R_0) = \overline{OO_1} \cdot \Omega_{tb} \cdot \vec{Y}_1 + R_1 \cdot (\Omega_0 - \Omega_{tb}) \cdot \vec{Y}_1 \\ \vec{V}(M \in S_0 / R_0) = R_0 \cdot \Omega_{tb} \cdot \vec{Y}_1 \end{cases} \quad \text{Équation 4-9}$$

L'égalité des deux équations du système donne :

$$\overline{OO_1} \Omega_{tb} + R_1 (\Omega_0 - \Omega_{tb}) = R_0 \Omega_{tb} \quad \text{Équation 4-10}$$

Comme $\overline{OO_1} \approx 0$ et $R_0 \cong R_1$, on obtient $\Omega_0 - \Omega_{tb} = \Omega_{tb}$ d'où $\Omega_{tb} = \frac{\Omega_0}{2}$ et par suite $f_{tb} = \frac{f_0}{2}$.

Le rotor se comporte donc comme un balourd et exerce une force centrifuge radiale. En plaçant un capteur de vibration sur le palier, le capteur enregistrera une vibration harmonique sinusoïdale dont la période est égale

à $T_{tb} = \frac{1}{f_{tb}} = 2T_0$ avec $T_0 = \frac{60}{N}$ ou N est la vitesse de rotation du rotor

en RPM.

Dans la pratique f_{tb} varie entre $0.4f_0$ et $0.49f_0$.

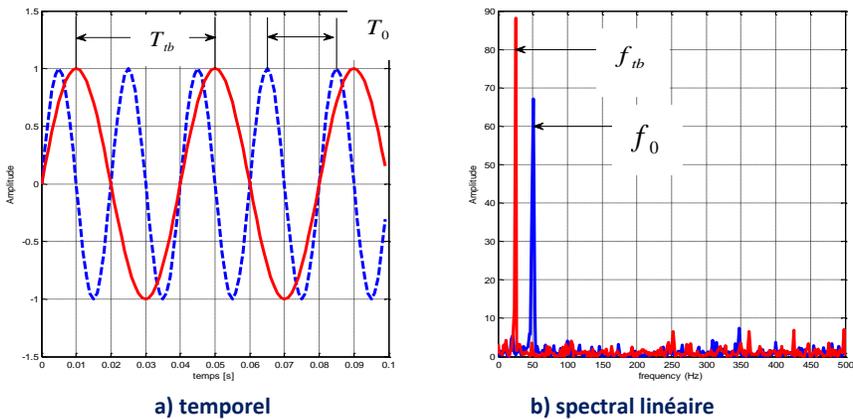


Figure 4-13 : Signature vibratoire d'un jeu de palier

D. Défaut d'alignement

On parle de défaut d'alignement des lignes d'arbre lorsque l'arbre moteur et l'arbre récepteur assemblés par un accouplement ne sont pas parfaitement alignés. Le mauvais lignage est un problème très courant, et de même importance que le déséquilibre. Les causes de désalignement sont :

- Mauvais montage,
- Dilatation thermique,
- Echauffement dissymétrique.
- Forces de cisaillement sur les paliers.

1. Désalignement Parallèle

Lorsque les lignes médianes des arbres sont montées parallèles sans se rencontrer, on a un désalignement parallèle voir Figure 4-14.

Dans le cas d'un désalignement parallèle, le palier de l'arbre récepteur est sollicité à des contraintes d'extension compression dans le plan (YZ) et une contrainte de flexion dans le plan (ZX).

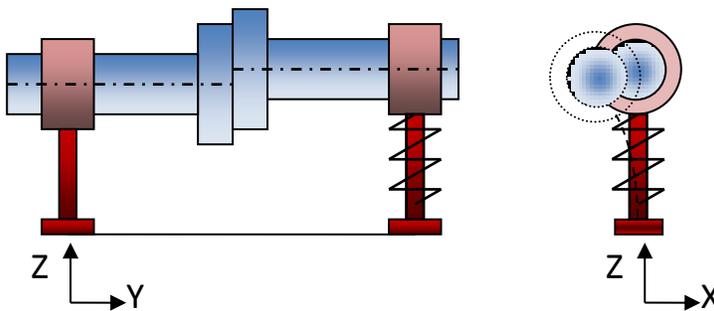


Figure 4-14 : Désalignement parallèle

Les paliers précontraints présentent des raideurs dans la direction (Z) K_{zz} et dans le plan (ZX) K_{zx} qui varient en fonction de la rotation de l'arbre de la forme $K(t)$ tel que :

$$K(t) = K_0 + \Delta K \times \sin(2\Omega t)$$

Équation 4-11

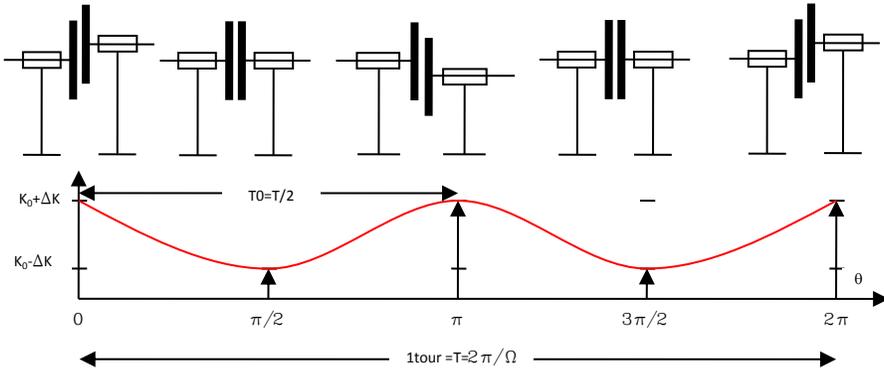


Figure 4-15 : Comportement des paliers pour un désalignement parallèle

Dans ce cas la force exercée par le palier est périodique dans la direction radiale à la fréquence 2 fois la fréquence de rotation de l'arbre moteur 2Ω .

La réponse temporelle du signal vibratoire du défaut d'alignement parallèle excité par un faible balourd sera enregistrée par des capteurs de vibration placés sur les paliers. Ce signal est la somme de deux signaux sinusoïdaux simples, l'un est résultat du balourd, le deuxième est dû à la variation de la raideur des paliers.

$$F(t) = F_{01} \sin(\Omega t) + F_{02} \sin(2\Omega t)$$

Équation 4-12

La représentation spectrale du signal vibratoire d'un défaut d'alignement parallèle indique deux pics à la première et à la deuxième harmonique de la fréquence de rotation de l'arbre moteur.

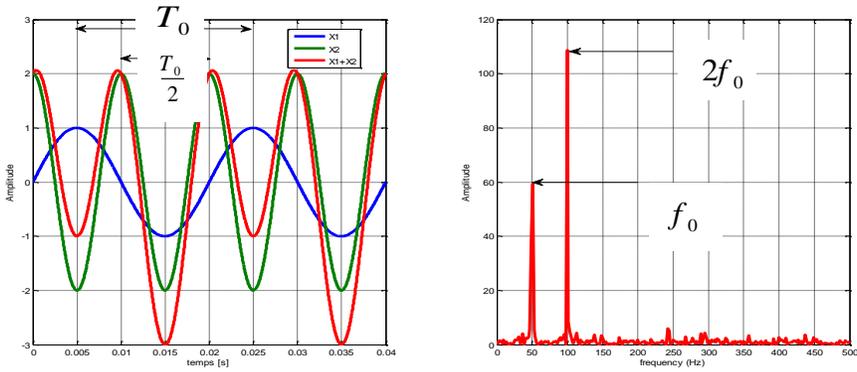


Figure 4-16 : Signal temporel Spectre d'un défaut d'alignement parallèle

2. Désalignement Angulaire

Le désalignement angulaire survient lorsque les axes des arbres se croisent. La vibration est à la fois radiale et axiale. Lorsque le désalignement angulaire est critique, l'amplitude de la vibration axiale est supérieure à l'amplitude de la vibration radiale.

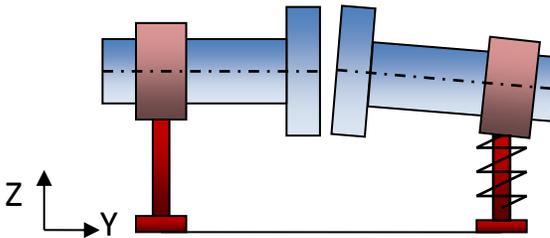


Figure 4-17 : Désalignement angulaire

La présence d'un défaut d'alignement angulaire contraint le palier de l'arbre récepteur en flexion pure dans le plan (YZ) comme indiqué sur la Figure 4-18. Un déplacement suivant les deux directions radiale (Z) et axiale (Y) est mesuré. La théorie des poutres en flexion pure montre que le déplacement axial est plus important. $\Delta Y(t) > \Delta Z(t)$



Figure 4-18 : Flexion pure des paliers

Le comportement des paliers en présence du défaut d'alignement angulaire varie suivant l'angle de rotation de l'arbre moteur. Le même raisonnement que dans le paragraphe précédent la raideur du palier varie périodiquement à la période $T = \frac{T_0}{2}$ et par suite la réponse spectrale au niveau des paliers dans les directions radiales et axiales est un signal présentant deux pics à la première et la deuxième harmonique de la fréquence de rotation de l'arbre moteur.

Le critère significatif du défaut angulaire est que les amplitudes de vibration dans la direction axiale sont plus importantes que celles dans la direction radiale.

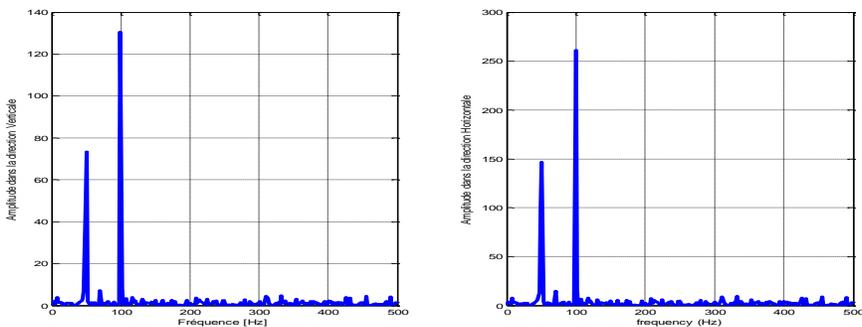


Figure 4-19 : Spectre typique d'un défaut d'alignement angulaire

3. Désalignement combiné

Dans les applications industrielles, le désalignement sera combiné: à la fois parallèle et angulaire. Il en serait de même pour les deux critères de sévérité qui seront combinés.

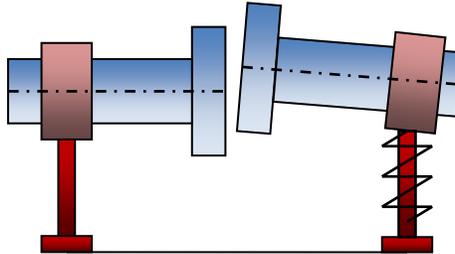


Figure 4-20 : Désalignement combiné

Une mesure de vibration sur une machine présentant la combinaison d'un déalignage parallèle et un déalignage angulaire produira un spectre avec des composantes importantes à 1 et 2 x la vitesse de rotation.

E. Défaut de courroie

Les défauts de courroies sont aussi des problèmes très courants néanmoins il faut distinguer entre problèmes liés à la courroie elle-même et les problèmes liés au désalignement des poulies ou la mauvaise tension de la courroie.



Figure 4-21 : Transmission par courroie

1. Courroie en mauvais état

Le principal défaut rencontré sur ce type de transmission est une usure avec détérioration de la courroie, un choc se produit alors à la fréquence de passage du défaut.

La fréquence à laquelle tournent les courroies s'appelle fréquence de passage des courroies et est donnée par :

$$f_{pc} = \frac{\pi \times D_1}{L} \times f_1 = \frac{\pi \times D_2}{L} \times f_2 \quad \text{Équation 4-13}$$

- D_i : Diamètre de la poulie i
- L : Longueur de la courroie
- f_i : Fréquence de rotation de la poulie de diamètre D_i

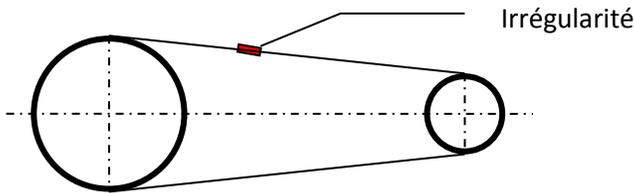


Figure 4-22 : Défaut de courroie

La longueur de la courroie est déterminée à partir de l'entraxe E et des diamètres des poulies menante et mené.

$$L = 2 \times E + \frac{1.57}{D_1 + D_2} + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4E} \quad \text{Équation 4-14}$$

Le profil des gorges des poulies n'a aucune importance du moment que le diamètre et la vitesse correspondent à la même poulie.

Lorsqu'une irrégularité apparaît sur une courroie, à cause d'un défaut de fabrication ou d'une usure non homogène, elle passera sur chaque poulie à la fréquence de passage de la courroie.

Chacun des contacts générés sur une poulie provoquera un impact. Ce phénomène se produit donc à une fréquence égale ou double de la fréquence de passage.

Le spectre d'un tel défaut est représenté à la figure ci-dessous :

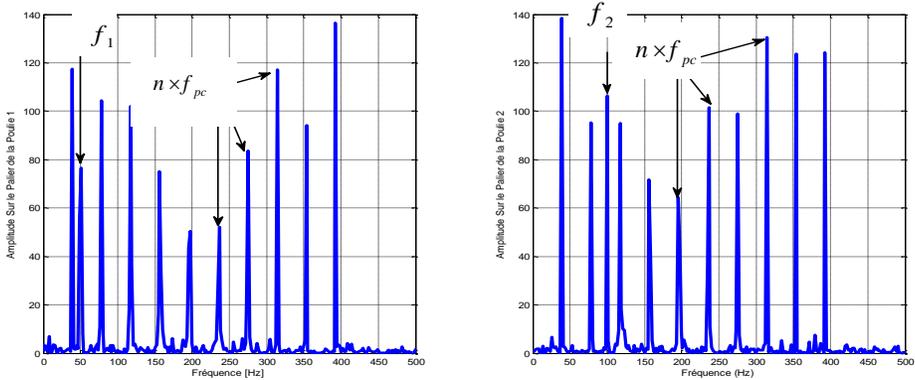


Figure 4-23 : Signature d'un défaut de courroie

Un défaut d'alignement et/ou de tension des courroies augmentera d'autant plus les niveaux aux fréquences de passage des courroies. Mais les défauts d'alignement et/ou de tension ne provoquent pas d'eux-mêmes des vibrations aux fréquences de passage des courroies.

2. Alignement ou tension

Un défaut d'alignement ou une tension trop élevée générera de hauts niveaux vibratoires à la vitesse du moteur et/ou de l'organe entraîné.

- Forte vibration du moteur sur l'organe entraîné et vice-versa : la vibration liée à la vitesse du moteur sera ressentie de manière plus importante sur les roulements de l'organe entraîné et vice-versa
- Haut niveau vibratoire du côté des courroies : les niveaux mesurés sur les roulements côtés poulies seront plus importants.

Les niveaux vibratoires plus importants dans le sens des courroies. Niveaux axiaux relativement plus élevés.

F. Défaut d'engrenage

Ce paragraphe donne un aperçu des méthodes utilisées pour le diagnostic des boîtes de vitesses. Il présente des défauts, des erreurs d'engrenages et les indicateurs utilisés pour la détection de panne.

On classe habituellement les défauts d'engrenages en trois catégories :

- les défauts de fabrication (erreurs de profil des dents, excentricité des roues, ...),
- les défauts de montage (défauts de parallélisme, d'entraxe, ...)
- les défauts apparaissant lors du fonctionnement (usure ou fissuration des dents) [16].

1. Types d'engrenages

On trouve 4 types essentiels d'engrenages montrés sur la Figure 4-24.

- Les engrenages droits Figure 4-24 (a) sont utilisés pour transmettre un mouvement rotatif entre des arbres parallèles. Elles sont généralement de forme cylindrique, et les dents sont droites et parallèles à l'axe de rotation.
- Les engrenages hélicoïdaux, utilisés pour transmettre le mouvement entre arbres parallèles, sont présentés dans la Figure 4-24 (b). La ligne de contact des dents d'engrenage hélicoïdal est diagonale à travers la face de la dent, de sorte qu'il existe un engagement progressif des dents et un transfert sans heurt de la charge d'une dent à l'autre.
- Pour un transfert de puissance entre les arbres qui se croisent, il y a des engrenages coniques à denture droite Figure 4-24 (c) et à denture hélicoïdale Figure 4-24 (d).
- Le train d'engrenages à vis sans fin Figure 4-24 (e) est constitué d'une vis sans fin, qui ressemble à une vis, et une roue, qui est un engrenage hélicoïdal. Ils sont silencieux et exempt de vibrations.

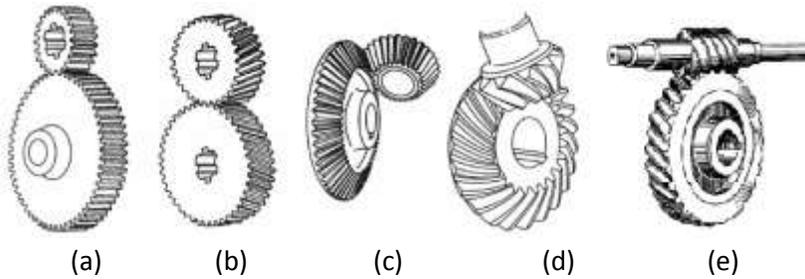


Figure 4-24 : Différents types d'engrenages

Soient R_1 et R_2 les rayons respectifs des roues menante et menée ; Ω_1 et Ω_2 leurs vitesses angulaires respectives.

Le pignon (1) tourne dans le sens horaire et entraîne un engrenage (2) dans le sens antihoraire. Le vecteur de force résultante entre une paire de pignons d'engrenage agit le long de la ligne de pression (également appelée ligne d'action ou génératrice).

Idéalement, lorsque deux engrenages sont en prise, leurs cercles primitifs roulent l'une sur l'autre sans glissement. La vitesse tangentielle est donnée par :

$$v = |R_1\Omega_1| = R_2\Omega_2$$

Equation 4-15

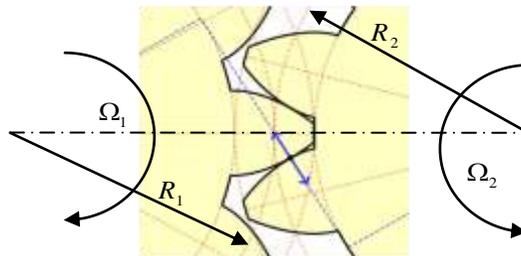


Figure 4-25 : Ligne d'action de deux roues

2. Raideur d'engrènement

Pendant la période d'engrènement T_e et pour un rapport de conduite ε donné ($1 < \varepsilon \leq 2$), la roue et le pignon sont d'abord en contact par un seul

couple de dents durant un laps de temps $(1-\varepsilon)T_e$, puis par deux couples de dents durant $(2-\varepsilon)T_e$. La Figure 4-26 présente la schématisation du phénomène d'engrènement.

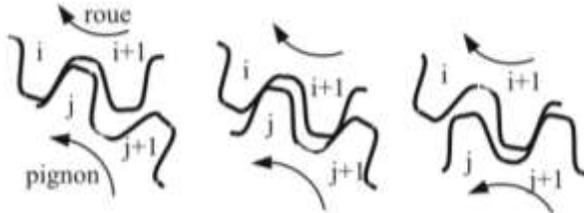


Figure 4-26 : Dents en prise lors de l'engrènement [16]

Ainsi, la raideur d'engrènement est dans ce cas périodique de période T_e et peut être en première approximation estimée par [16] :

$$K(t) = \begin{cases} K_{\max} & \text{si } nT_e \leq t \leq (n+\varepsilon-1)T_e \\ K_{\min} & \text{si } (n+\varepsilon-1)T_e \leq t \leq (n+1)T_e \end{cases} \quad \text{Équation 4-16}$$

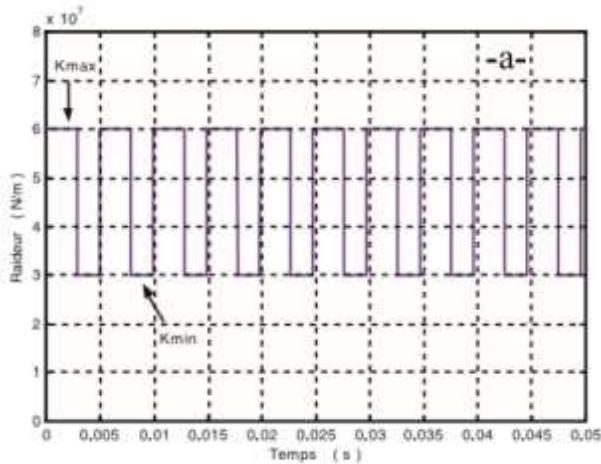


Figure 4-27 : Raideur d'engrènement [16]

3. Vibration des engrenages en bon état

Les engrenages rigides et de géométries parfaites ne produisent pas généralement des vibrations. La modification du profil idéale d'une dent ou de sa géométrie peut générer des vibrations, dont la mesure et l'analyse peut aider à diagnostiquer les pannes de boîte de vitesses.

Les principales sources de ces vibrations sont la déflexion sous charge des dents, la distorsion de roue lors du traitement thermique et les erreurs géométriques dans le profil lui-même, résultant du processus de taillage d'engrenage et à l'usure.

a) Train d'engrenage

Les vibrations sont liées aux chocs d'engrènement qui se produisent au moment de l'engrènement des dentures.

Soit Z_1 , Z_2 le nombre de dents respectif de la roue 1 et 2 ; f_1 et f_2 les fréquences de rotation en Hz.

En supposant que les dents sont parfaitement taillées, également espacées, parfaitement lisse, et tout à fait rigide, la fréquence d'engrènement est égale au nombre de dents de la roue Z , multiplié par la vitesse de l'arbre sur lequel la roue est montée f .

La fréquence fondamentale des chocs est appelée fréquence d'engrènement:

$$f_e = f_1 \times Z_1 = f_2 \times Z_2 \quad \text{Equation 4-17}$$

Une denture correcte montre les fréquences f_1 et f_2 des deux arbres ainsi que la fréquence d'engrènement f_e .

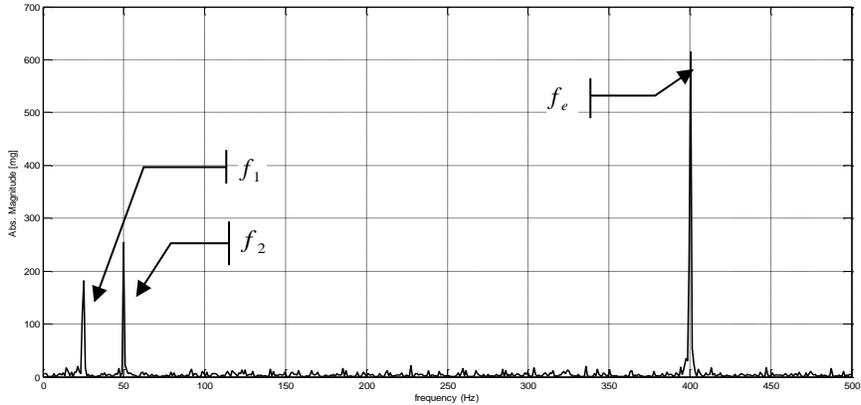


Figure 4-28 : Spectre d'un engrenage sans défaut

b) Engrenage Epicycloïdal

Un train épicycloïdal ou engrenage planétaire, désigne un système de transmission de puissance entre deux ou plusieurs arbres dont certains tournent non seulement autour de leur propre axe, mais aussi autour d'un autre axe. Les engrenages peuvent être cylindriques ou coniques. Ceux dont l'axe coïncide avec un axe fixe dans l'espace s'appellent "planètes" et ceux qui tournent avec leur axe autour d'un autre s'appellent "satellites".

Les trains épicycloïdaux ont besoin de deux lois d'entrée/sortie. Généralement un des éléments est bloqué ce qui donne une loi d'entrée/sortie.

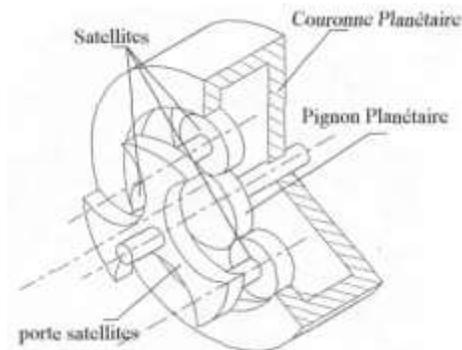


Figure 4-29 : Train épicycloïdal

Soit :

Z_p et f_p : nombre de dents et fréquence du pignon planétaire.

Z_c et f_c : nombre de dents et fréquence de rotation du couronne.

La fréquence d'engrènement est donnée par [12]:

$$f_e = Z_p (f_p - f_{ps}) = Z_c (f_{ps} - f_c) \quad \text{Équation 4-18}$$

Avec la fréquence du porte satellite:

$$f_{ps} = \frac{Z_s f_s + Z_c f_c}{Z_s + Z_c} \quad \text{Équation 4-19}$$

4. Dentures détériorées

Les détériorations de surfaces au niveau des dentures d'engrenages ont différentes formes et causes :

- Usure : phénomène local caractérisé par un enlèvement de matière dû au glissement relatif de deux surfaces l'une sur l'autre ;
- Usure par interférence : produite au début ou en fin d'engrènement par les interférences de fonctionnement entre les dents conjuguées (mauvaise conception, flexion exagérée des dents en service).
- Corrosion : attaque chimique ou électrochimique du matériau
- Grippage : résulte de la rupture du film lubrifiant sous l'action d'une surchauffe ou d'une pression excessive en fonctionnement, provoquant un contact métal/métal, soudure puis arrachement.
- Piqûres : endommagements de surface dus à la fatigue de contact, se présentant sous forme de cavités de différentes tailles.
- Ecaillage : endommagement profond initié en sous-couche des dents d'engrenages traités superficiellement, à la profondeur de la contrainte de cisaillement maximum.

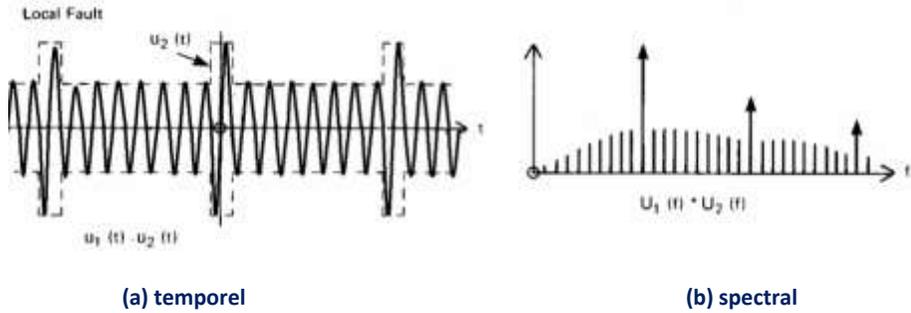


Figure 4-30 : Défaut localisé [12]

Considérant un défaut localisé, celui-ci a des effets de modulation d'amplitude. La Figure 4-30 montre l'effet de la distribution des défauts sur la bande latérale du modèle. Un défaut très localisé, par exemple, sur une dent, aurait tendance à donner une modulation par une courte impulsion de longueur de l'ordre de la période de maille de la dent, mais répétées une fois par révolution. La Figure 4-31, montre dans le spectre que ce défaut localisé entraînerait la génération d'un grand nombre de bandes latérales du niveau presque uniforme.

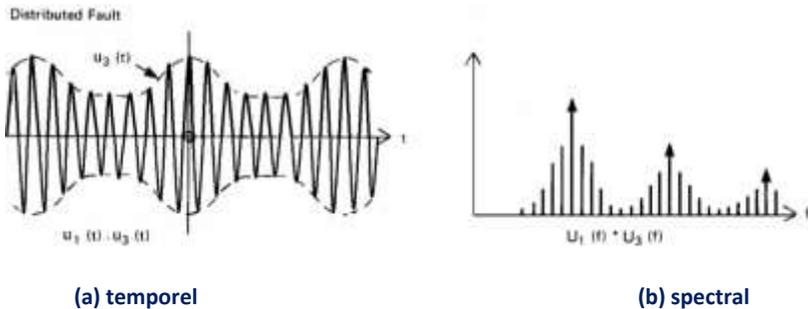


Figure 4-31 : Défaut distribué [12]

L'effet d'une faute distribuée est représenté sur la Figure 4-31. On voit que lorsque l'enveloppe du défaut dans le signal de temps devient plus large, il rend l'enveloppe correspondant au domaine de fréquences plus étroite. Les produits de modulation résultant deviennent plus évidemment des bandes

latérales regroupés autour des harmoniques de la fréquence d'engrènement.

En présence d'un tel défaut l'amplitude de vibration à la fréquence d'engrènement devient très importante. Mais l'augmentation de cette amplitude n'est pas suffisante pour caractériser un défaut d'engrenage. Pour qu'un défaut soit significatif il faut une augmentation de l'amplitude à la fréquence d'engrènement avec une génération d'autres fréquences ($\times f_e$).

Si on détecte de nombreux harmoniques de la fréquence d'engrènement ($3f_e$ et plus), on peut déduire qu'il y a un choc à chaque denture indiquant ainsi une détérioration de l'ensemble des dents.

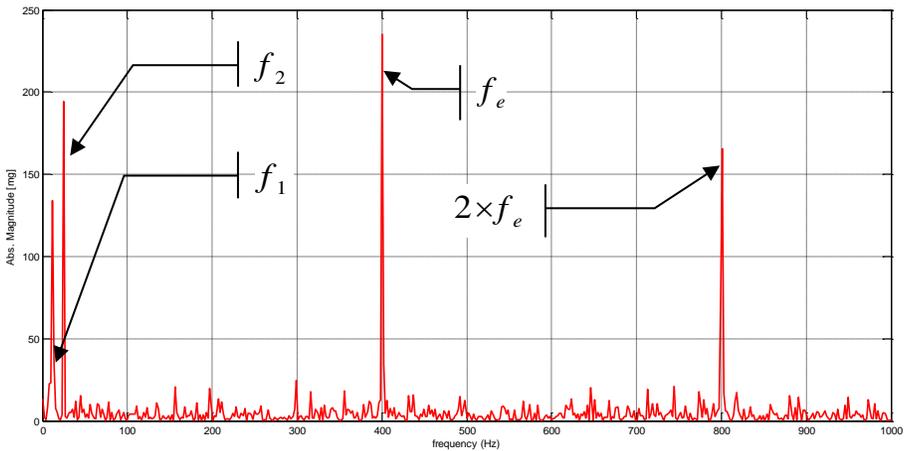


Figure 4-32 : Signature vibratoire d'un défaut d'engrènement

5. Une seule dent détériorée

La rupture des dents résulte généralement de leurs fatigues causées par les efforts continuellement répétés après un temps de fonctionnement plus ou moins long. La rupture peut aussi être causée par un fragment de métal introduit accidentellement dans la zone d'engrènement. Elle peut être aussi le résultat d'une trempe défectueuse ou d'une mauvaise répartition des charges.

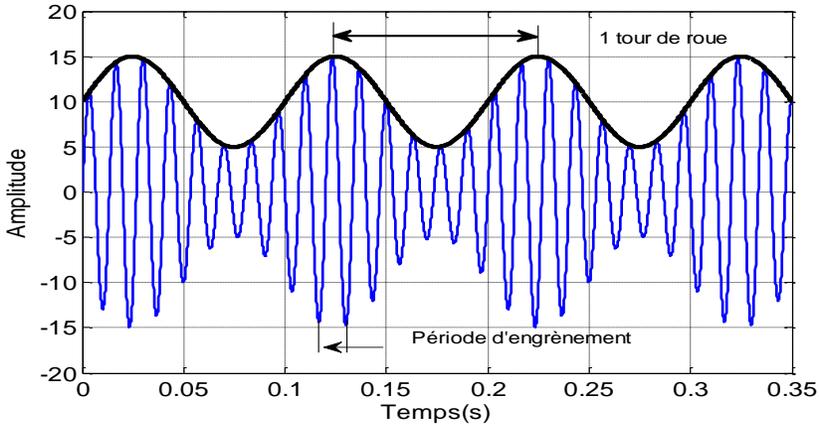


Figure 4-33 : Modulation d'amplitude due à un défaut sur une dent

Si une seule dent est détériorée, il y aura un choc périodique à chaque tour de roue. On verra donc de nombreuses harmoniques de la fréquence de rotation de l'engrenage 1 ou 2 en cause ($\times f_1$ ou $\times f_2$) ainsi que des modulations de fréquences $f_e \pm n \times f_1$ ou $f_e \pm n \times f_2$.

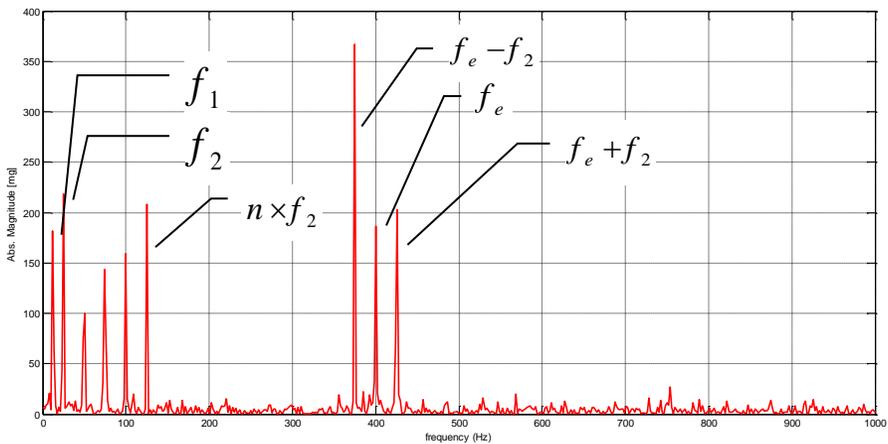


Figure 4-34 : Signature d'une dent détériorée sur la roue 2

6. Une denture détériorée dans chaque roue

Si une dent est détériorée sur chaque roue, il y aura un choc périodique à chaque tour de roue des deux engrenages. On verra donc de nombreuses

harmoniques des deux fréquences de rotation. Il y a une coïncidence entre les deux dents détériorées. Ce phénomène fait apparaître une fréquence de coïncidence qui se calcule d'après le PPCM (plus petit commun multiple) du nombre de dents.

$$f_c = \frac{f_e}{PPCM(Z_1, Z_2)}$$

Équation 4-20

La signature d'un tel défaut présentera des pics multiples ($\times f_1$ et $\times f_2$), la fréquence de coïncidence f_c ainsi des modulations de fréquences ($f_e \pm n \times f_1$ et $f_e \pm n \times f_2$).

Le spectre de fréquence du signal temporel mesuré sur une boîte de vitesses est si complexe qu'on ne peut pas l'interpréter directement. L'analyse de cepstre est utilisée en tant que technique de post-traitement pour détecter la périodicité du spectre.

Le cepstre est considéré comme un outil extrêmement utile pour les deux tâches de surveillance des vibrations et de l'analyse :

- a) Pour la détection des défauts:
 - il s'agit d'une mesure sensible de la croissance des familles harmoniques / bande latérale
 - les données sont réduites à une seule ligne par famille;
 - il est insensible à l'emplacement du point de mesure, à la combinaison de phase d'amplitude et de fréquence, et au chargement de la boîte de vitesses.
- b) Pour le diagnostic de défaut:
 - il s'agit d'une mesure précise de la distance entre les composantes de fréquence;
 - il peut être calculé à partir de n'importe quelle section d'un spectre;
 - il peut être utilisé pour la séparation des différentes familles de bandes latérales;

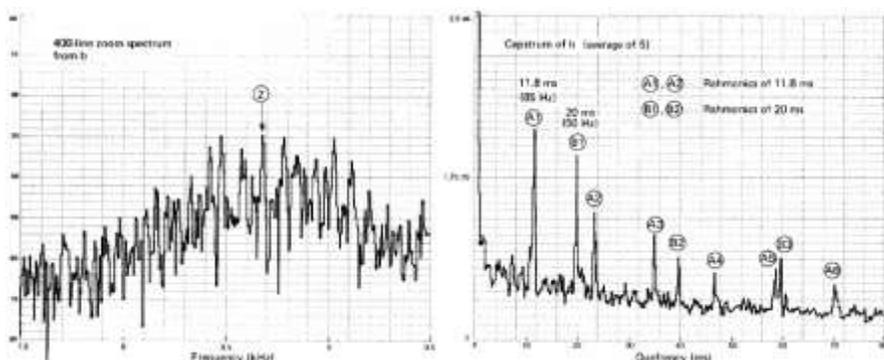


Figure 4-35 : Spectre d'un engrenage avec le cepstre correspondant

Les engrenages peuvent nécessiter ce type d'analyse. En effet, la fréquence d'engrènement est souvent modulée par les fréquences de rotation des roues menante et menée. Le cepstre permet de séparer et d'identifier sur une seule image toutes les fréquences de modulation (fréquences de rotation des arbres d'entrée, intermédiaire et de sortie dans un réducteur). (voir Figure 4-35).

G. Détérioration des roulements

Les éléments essentiels d'un roulement sont représentés dans la figure suivante et qui sont :

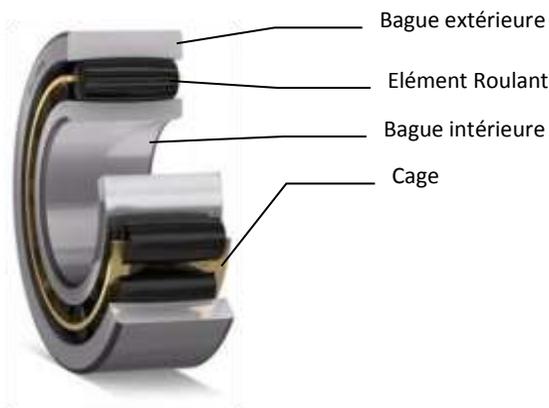


Figure 4-36: Constitution des roulements

- Bague intérieure : montée sur l'arbre et qui tourne avec en cas d'un montage arbre tournant.
- Bague extérieure : montée sur le moyeu et qui est fixe.
- Éléments roulants (bille, rouleau cylindrique, rotule) : incorporés entre la bague intérieure et la bague extérieure.
- Cage : rassemble les éléments roulants et conserve le même espacement entre eux.

Les roulements sont les parties les plus sollicitées des machines. La cause de vibration provient d'une perte de fragment de métal. Ce défaut précurseur de la destruction est l'écaillage. Il se traduit par des chocs répétés des billes sur la cage de roulement.

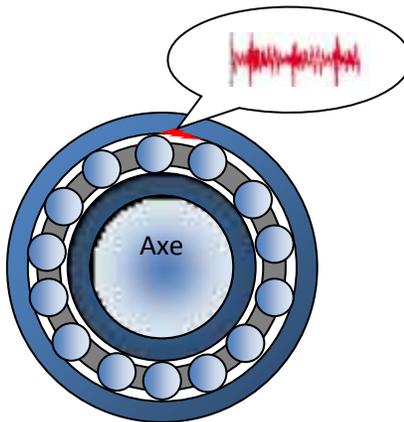


Figure 4-37: Source de vibration dans les roulements

La perte de fragments peut provenir de :

- Glissement de matière (charge excessive, vitesse excessive, friction, mauvais lubrifiant, mauvais lignage).
- Effritement (rainures latérales) ou écorchures (localisées longitudinalement) dues à l'inclusion de corps étrangers (jeu, lignage, étanchéité).
- Ecaillage et craquelure (fatigue de surface due à la surchauffe et à un mauvais lubrifiant).
- Corrosion due à une mauvaise étanchéité

1. Cinématique des roulements

Les composantes principales des roulements ont leurs fréquences de rotation caractéristiques, à laquelle une énergie vibratoire se produit par l'impact périodique du défaut.

Les estimations théoriques de ces fréquences peuvent être obtenues en considérant que les géométries des différents organes sont parfaites, telles que :

- a. Les pistes des bagues intérieurs et extérieurs sont parfaitement circulaires ;
- b. Tous les éléments roulants ont une géométrie parfaite (sphérique, cylindrique...) et de même dimension.
- c. Une coaxialité parfaite entre la bague intérieure et la bague extérieure.

D'autres hypothèses sont utilisées pour calculer les vitesses angulaires des composantes des roulements :

- a. Les éléments roulants sont rigides (déformations de contact sont négligées) ;
- b. Les éléments roulants ont un mouvement de rotation pure sur leurs pistes (glissement négligé) (vitesses linéaires au point de contact entre élément roulant et sa piste sont identiques) ;
- c. L'effet de la lubrification est négligé.
- d. Dans le tableau suivant on présente la désignation des différents paramètres géométriques des roulements.

Paramètre	β	D_i	D_o	D_m	D_B
Désignation	Angle de contact	Diamètre intérieur de contact	Diamètre extérieur de contact	Diamètre primitif de contact	Diamètre de l'élément roulant

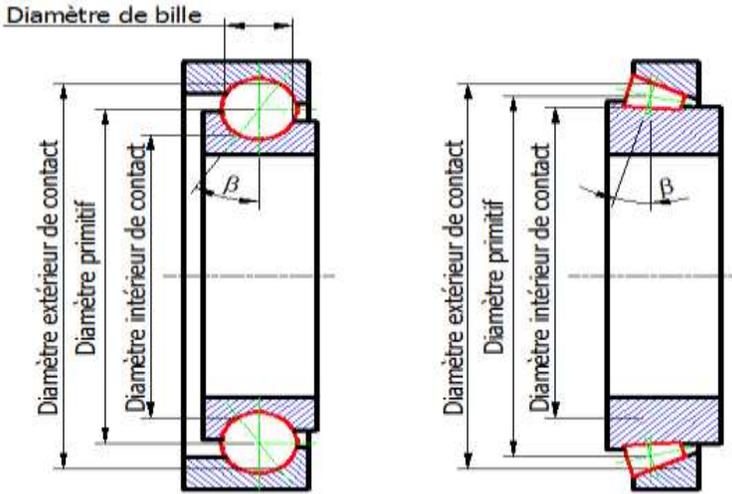


Figure 4-38 : Paramètres géométriques des roulements

La vitesse linéaire de la bague extérieure au point de contact est donnée par la relation suivante :

$$v_o = \omega_o \frac{D_o}{2} = \frac{\pi N_o}{30} \left(\frac{D_o}{2} + \frac{D_B}{2} \cos \beta \right) = \frac{\pi}{60} N_o D_m \left(1 + \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right)$$

Équation 4-21

La vitesse linéaire de la bague intérieure au point de contact est donnée par la relation suivante :

$$v_i = \omega_i \frac{D_i}{2} = \frac{\pi N_i}{30} \left(\frac{D_m}{2} - \frac{D_B}{2} \cos \beta \right) = \frac{\pi}{60} N_i D_m \left(1 - \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right)$$

Équation 4-22

La vitesse linéaire au centre des éléments roulants est égale à la moyenne des vitesses de la bague intérieure et de la bague extérieure au point de contact.

$$v_m = \frac{v_i + v_o}{2} = \frac{\pi}{120} N_o D_m \left(1 + \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) + \frac{\pi}{120} N_i D_m \left(1 - \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right)$$

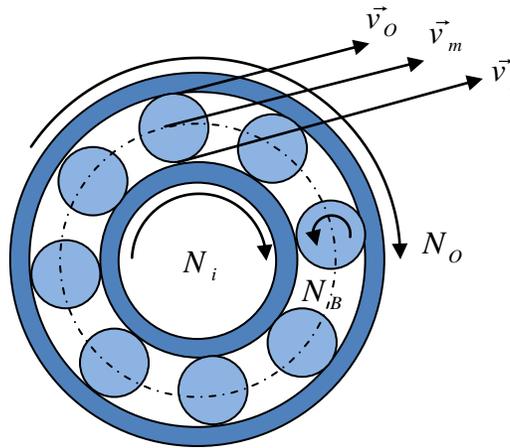


Figure 4-39 : Paramètres cinématiques du roulement

2. Défaut de cage (rupture)

La fréquence à laquelle les billes ou les rouleaux tournent autour de l'axe de l'arbre correspond à la vitesse de rotation de la cage. Cette fréquence est désignée par *FTF* : Fundamental Train Frequency

Une rupture de cage peut être provoquée pour deux raisons :

- une charge axiale trop élevée sur des roulement qui ne sont pas prévus à cet effet,
- un serrage trop faible du roulement sur l'arbre qui entraîne, sous l'effet de la charge dynamique, un jeu axial.

Comme la vitesse linéaire de la cage au diamètre primitif est :

$$v_m = \frac{\pi}{60} N_m D_m$$

L'expression de la vitesse de rotation de la cage est déduite des expressions précédentes :

$$N_m = \frac{1}{2} \left[N_o \left(1 + \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) + N_i \left(1 - \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \right] \quad \text{Équation 4-24}$$

En terme de fréquence on peut écrire l'expression de fréquence de rotation de la cage par :

- $f_m = \frac{1}{2}f_i \left(1 - \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right)$ cas d'arbre tournant $f_o = 0$;
- $f_m = \frac{1}{2}f_o \left(1 + \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right)$ cas de moyeu tournant $f_i = 0$

Dans ce cas si un défaut apparaît sur la cage la fréquence $FTF = f_m$ apparaît dans le spectre des vibrations du roulement.

Arbre tournant $FTF = \frac{1}{2}f_i \left(1 - \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right)$ Équation 4-25

Moyeu tournant $FTF = \frac{1}{2}f_o \left(1 + \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right)$ Équation 4-26

3. Défaut de billes ou de rouleaux

La fréquence à laquelle les billes tournent autour de leurs propres axes dans la cage est donnée par BSF : Ball Spin Frequency.

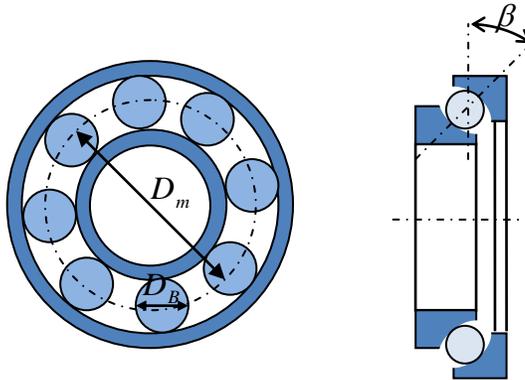


Figure 4-40 : Paramètres caractéristiques des roulements

La vitesse de rotation relative de la cage par rapport à la bague intérieure est égale à la valeur absolue de la différence entre la vitesse de rotation de la cage et la vitesse de rotation de la bague intérieure :

$$N_{mi} = |N_m - N_i| = \frac{N_r}{2} \left(1 + \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \quad \text{Équation 4-27}$$

Avec N_r est la vitesse de rotation relative entre la bague intérieure et la bague extérieure : $N_r = N_o - N_i$

La vitesse de rotation de la bague extérieure par rapport à la cage est exprimée par la valeur absolue de la différence entre la vitesse de rotation de la cage et la vitesse de rotation de la bague extérieure.

$$N_{mo} = |N_m - N_o| = \frac{N_r}{2} \left(1 - \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \quad \text{Équation 4-28}$$

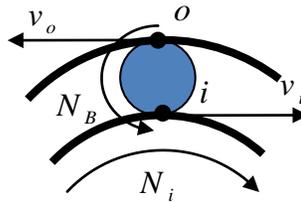


Figure 4-41 : Rotation des éléments roulants

La vitesse de rotation des éléments roulants autour de leurs axes de rotation sont obtenues en bloquant la cage $N_m = 0$ ce qui donne $N_{mi} = -N_i$ et $N_{mo} = N_o$

En faisant l'égalité des vitesses linéaires $v_i = v_o$ avec :

$$v_i = \frac{\pi}{60} N_i D_i \text{ et } v_B = -\frac{\pi}{60} N_B D_B \text{ au point } (i) \Rightarrow N_{mi} D_i = N_B D_B$$

$$v_o = -\frac{\pi}{60} N_o D_o \text{ et } v_B = -\frac{\pi}{60} N_B D_B \text{ au point } (o) \Rightarrow N_{mo} D_o = N_B D_B$$

En tenant en considération l'expression du diamètre primitif de la cage

$D_m = \frac{D_o + D_i}{2}$ on obtient d'après les équations précédentes :

$$N_B = \frac{N_r D_m}{2 D_B} \left(1 - \left(\frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right)^2 \right) \quad \text{Equation 4-29}$$

En termes de fréquence $f_B = \frac{f_r D_m}{2 D_B} \left(1 - \left(\frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right)^2 \right)$

La fréquence d'impact d'un défaut sur l'élément roulant est en fait $2f_B$ car ce défaut frappe deux surfaces (pistes des bagues intérieure et extérieure) pendant un tour.

Dans ce cas si un défaut apparaît sur les éléments roulants des pics aux fréquences multiples de la fréquence $BSF = 2f_B$ apparaissent dans le spectre des vibrations du roulement.

$$BSF = f_r \frac{D_m}{D_B} \left(1 - \left(\frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right)^2 \right) \quad \text{Équation 4-30}$$

Un défaut de billes génère une image typique dans le spectre. Il y aura plusieurs groupes de pics qui apparaissent composés d'un pic central et de modulations autour de ce pic central. Dans la grande majorité des cas, ce pic central correspond au défaut de billes et la modulation correspond au défaut de cage.

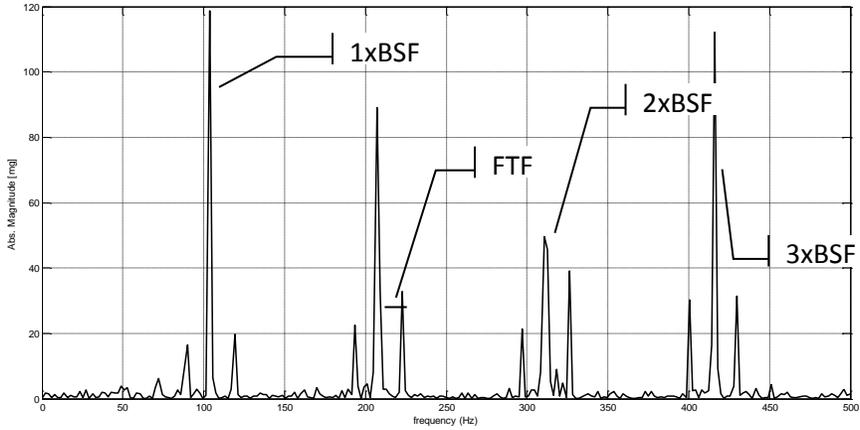


Figure 4-42: Spectre typique d'un défaut de bille

4. Défauts des bagues internes et externes

Supposons que dans un roulement on a Z éléments roulants.

- Un défaut sur la piste interne du roulement aura un impact sur les éléments roulants tous les $Z \times N_{mi}$ rotation par minute,
- Un défaut sur la piste externe du roulement aura un impact sur les éléments roulants tous les $Z \times N_{mo}$ rotation par minute,

Donc la fréquence de passage des éléments roulants sur ces défauts est donnée par :

$$\text{Sur la bague extérieure : } Z \cdot N_{mo} = \frac{Z}{2} N_r \left(1 - \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \quad \text{Équation 4-31}$$

$$\text{Sur la bague intérieure : } Z \cdot N_{mi} = \frac{Z}{2} N_r \left(1 + \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \quad \text{Équation 4-32}$$

En termes de fréquence les défauts dans la bague intérieure et extérieure se manifeste par des multiples de :

- **BPFO** : Ball Pass Frequency Outer Race
- **BPFI** : Ball Pass Frequency Inner Race

Avec :

$$BPFO = \frac{Z}{2} f_r \left(1 - \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \quad \text{Équation 4-33}$$

$$BPFI = \frac{Z}{2} f_r \left(1 + \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \quad \text{Équation 4-34}$$

La figure suivante illustre une réponse temporelle et spectrale pris dans une pompe qui tourne à 1458 RPM, dont les paliers sont guidés des roulements SKF 6305. Le spectre montre des pics multiple de BPFO marqué par ces harmoniques H.

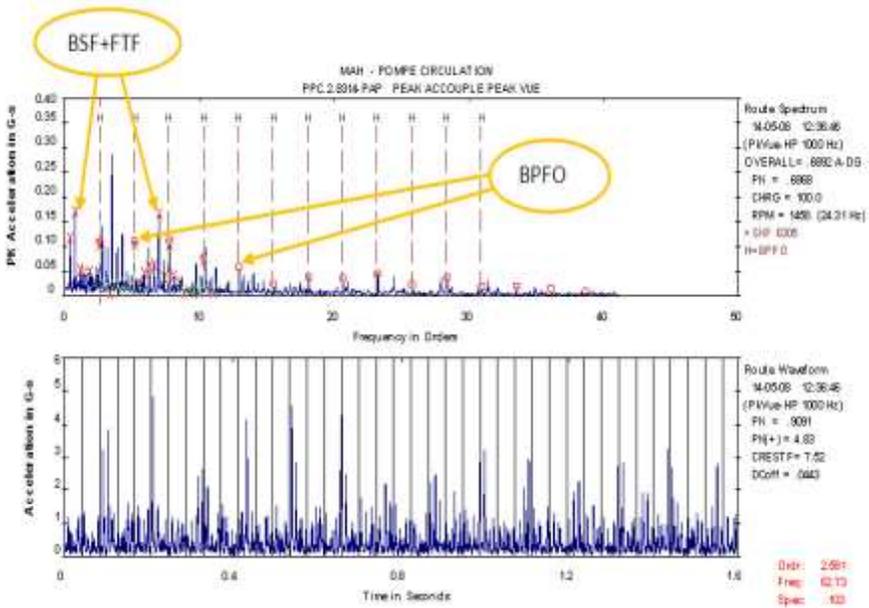


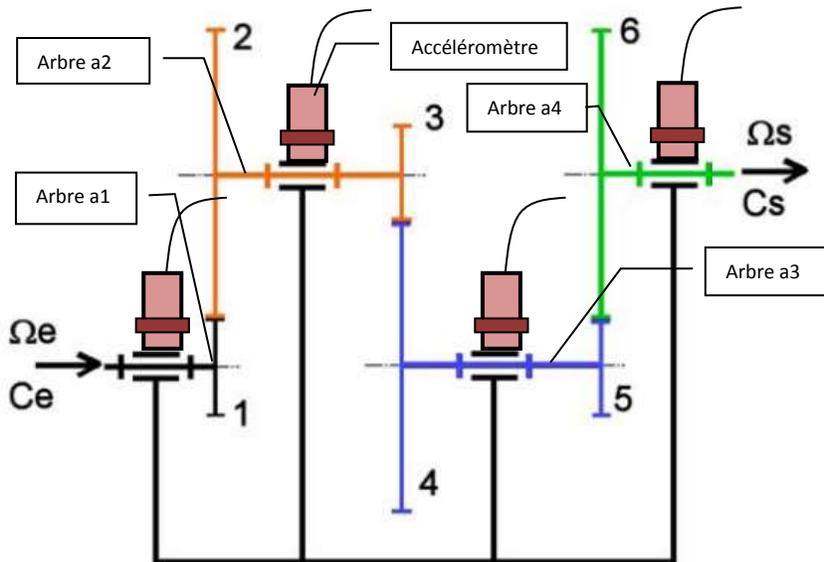
Figure 4-43 : Signal temporel et spectral d'un défaut de roulement

Exercices avec corrections

EXERCICE N°1

Soit la cinématique d'une boîte à vitesse donnée par le schéma suivant. La vitesse d'entrée est égale à $\Omega_e = 314.159 \text{ rad/s}$ et le couple d'entrée est égale à $C_e = 31 \text{ Nm}$.

Une surveillance online est appliquée à cette boîte à vitesse dans le but de détecter les défaillances précoces.



On donne :

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Nb de dents	20	40	24	48	32	64

- 1) Calculer les fréquences de rotation des arbres f_{a1} ; f_{a2} ; f_{a3} ; f_{a4} en hertz.

$$f_{a1} = \frac{\Omega_2}{2\pi} = 50\text{Hz}$$

$$f_{a2} = f_{a1} \frac{Z_1}{Z_2} = 50 \frac{20}{40} = 25\text{Hz}$$

$$f_{a3} = f_{a2} \frac{Z_3}{Z_4} = 25 \frac{24}{48} = 12.5\text{Hz}$$

$$f_{a4} = f_{a3} \frac{Z_5}{Z_6} = 12.5 \frac{32}{64} = 6.25\text{Hz}$$

2) Calculer les fréquences d'engrènement f_{e12} ; f_{e34} ; f_{e56} en hertz.

$$f_{e12} = f_{a1}Z_1 = f_{a2}Z_2 = 50 \times 20 = 1000\text{Hz}$$

$$f_{e34} = f_{a2}Z_3 = f_{a3}Z_4 = 25 \times 24 = 600\text{Hz}$$

$$f_{e56} = f_{a3}Z_5 = f_{a4}Z_6 = 12.5 \times 32 = 400\text{Hz}$$

3) Calculer les fréquences de coïncidence f_{c12} ; f_{c34} ; f_{c56} en hertz.

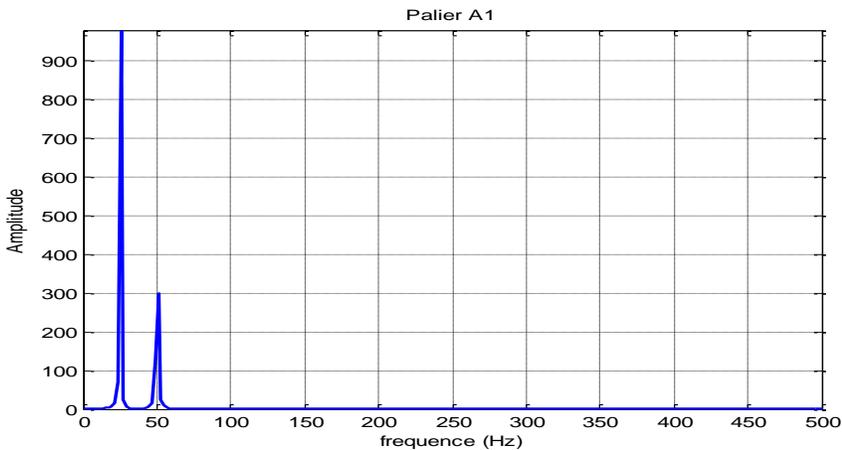
$$f_{c12} = \frac{f_{e12}}{\text{PPCM}(Z_1, Z_2)} = \frac{1000}{\text{PPCM}(20, 40)} = \frac{1000}{40} = 25\text{Hz}$$

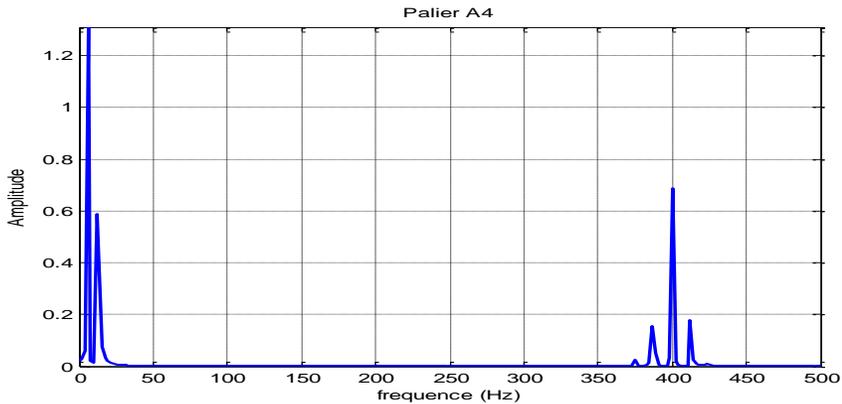
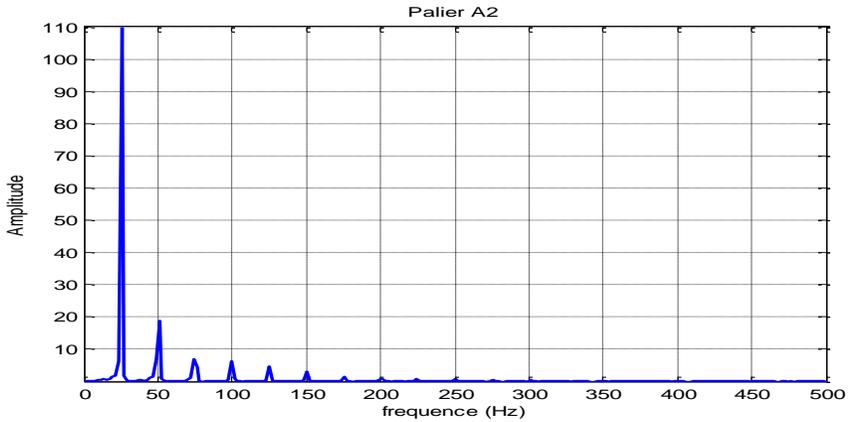
$$f_{c34} = \frac{f_{e34}}{\text{PPCM}(Z_3, Z_4)} = \frac{600}{\text{PPCM}(24, 48)} = \frac{600}{48} = 12.5\text{Hz}$$

$$f_{c56} = \frac{f_{e56}}{\text{PPCM}(Z_5, Z_6)} = \frac{400}{\text{PPCM}(32, 64)} = \frac{400}{64} = 6.25\text{Hz}$$

Les capteurs de vibration sont placés sur les paliers des arbres 1, 2, 3 et 4.

Les signaux enregistrés sont représentés dans les figures suivantes.





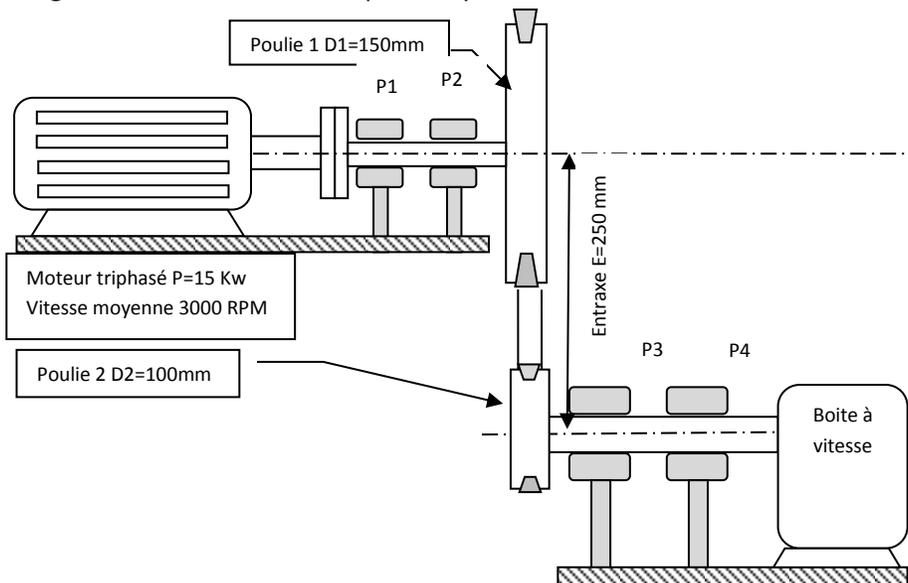
4) Interpréter dans un tableau les trois spectres en mentionnant la nature du défaut.

Palier	Pic	Fréquence	Harmonique	Défaut
A1	1 ^{ère} pic	25	$0.5 \times f_{a1}$	Jeu de palier de l'arbre 1
	2 ^{ème} pic	50	f_{a1}	Balourd roue 1
A2	1 ^{ère} pic	25	f_{a2}	Défaut de fixation dans le palier de l'arbre 2
	2 ^{ème} pic	50	$2 \times f_{a2}$	
	3 ^{ème} pic	75	$3 \times f_{a2}$	
	4 ^{ème} pic	100	$4 \times f_{a2}$	

	5 ^{ème} pic	125	$5 \times f_{a2}$	Une denture cassée dans la roue Z5
	6 ^{ème} pic	150	$6 \times f_{a2}$	
	7 ^{ème} pic	175	$7 \times f_{a2}$	
A4	1 ^{ère} pic	6.25	f_{a4}	
	2 ^{ème} pic	12.5	f_{a3}	
	3 ^{ème} pic	375	$f_{e56} - 2 \times f_{a3}$	
	4 ^{ème} pic	387,5	$f_{e56} - f_{a3}$	
5 ^{ème} pic	400	f_{e56}		
6 ^{ème} pic	412.5	$f_{e56} + f_{a3}$		

EXERCICE N°2

Un système de transmission de puissance et de mouvement schématisé par la figure suivante est surveillé par analyse vibratoire.



1) Calculer les fréquences de rotation des poulies f_1 et f_2 ,

$N=3000$ RPM ; $D1=150$; $D2=100$; $E=250$;

$$f_1 = \frac{3000}{60} \quad f_1 \times D1 = f_2 \times D2 \Rightarrow f_2 = \frac{f_1 \times D1}{D2} = \frac{50 \times 150}{100}$$

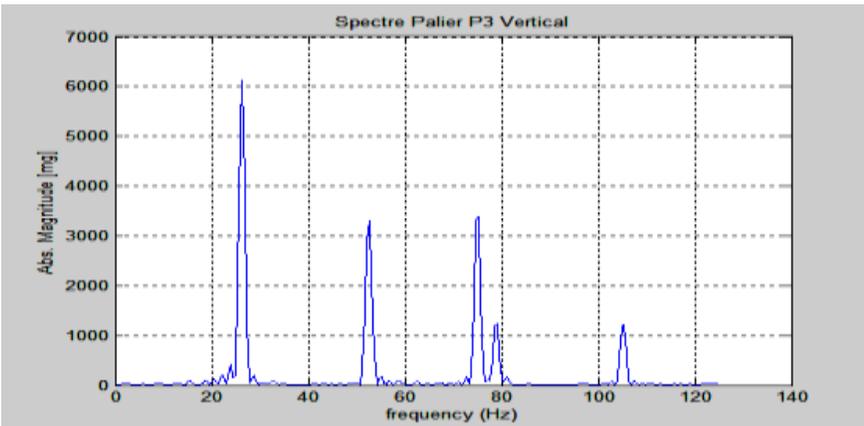
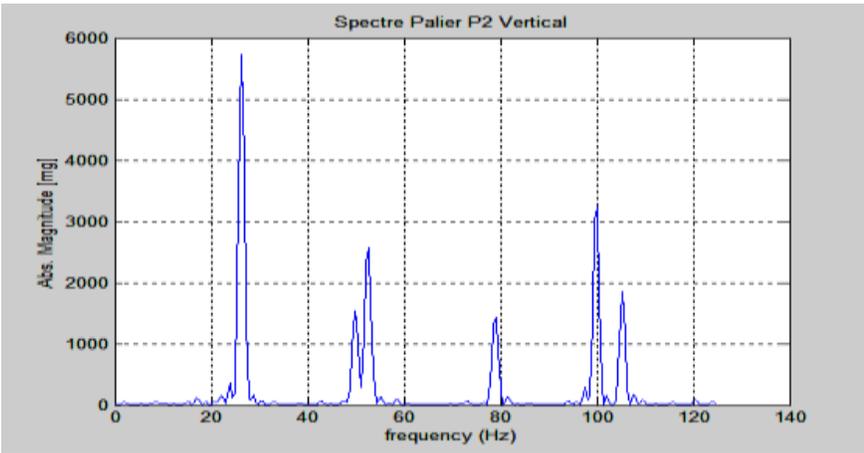
$$f_1 = 50\text{Hz} \quad f_2 = 75\text{Hz}$$

- 2) Calculer la fréquence du défaut de la courroie f_{pc} , sachant que La longueur du courroie est donnée par la relation suivante :

$$L = 2E + 1.57(D_1 + D_2) + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4E} \quad L = 895 \text{ mm}$$

$$f_{pc} = \frac{\pi \times D_1}{L} \times f_1 = \frac{\pi \times 150}{895} \times 50 \quad f_{pc} = 26.32 \text{ Hz}$$

Les mesures de vibrations sur les paliers P2 et P3 sont représentées par leurs spectres mentionnés sur les figures suivantes.



- 3) Interpréter ces spectres et indiquer les défauts (indiquer la signification de chaque pic).

Spectre Palier P2 Vertical:

Multiple de f_{pc} : **défait de courroie.**

2 pics multiples de la fréquence de rotation de la poulie P1, dont l'amplitude du deuxième pic ($2xf_1$) est supérieure à celle de la première :

défait d'alignement.

Spectre Palier P3 Vertical :

On remarque des pics multiples de f_{pc} plus accentuées : **Défait de courroie.**

- 4) Proposer les rectifications nécessaires pour diminuer l'impact des défauts sur le système.

Changement de la courroie

Alignement Laser des deux poulies

Bibliographie

- [1] Jacques MOREL, Surveillance vibratoire et maintenance prédictive, Techniques de l'ingénieur R6100.
- [2] Michel VILLAIN (IUT de Saint-Malo), Séminaire Gestion de la maintenance, Projet FSP 200-134, ISET DE NABEUL 23 – 28 MAI 2004.
- [3] Alain Boulenger, Christian Pachaud, Analyse vibratoire en maintenance, Surveillance et diagnostic des machines, L'usine Nouvelle série gestion industrielle 2^e édition 2003 DUNOD.
- [4] Marc Thomas, Frédéric Laville, Simulation des vibrations mécaniques par Matlab Simulink et Ansys, Presse de l'université du Québec 2007.
- [5] David Augeix, Analyse vibratoire des machines tournantes, Technique de l'ingénieur, BM5145
- [6] Brüel & Kjaer; Guide d'achat, mesure mécanique; Les accéléromètres; 2002.
- [7] National Instruments; Acquisition et traitement de signaux dynamiques;
- [8] Jacky DUMAS et Bruno BENNEVAULT; Analyse du signal (FFT et Filtrage numérique) & Analyse des systèmes; 01dB-STELL (Groupe MVI technologies); Version Fevrier 2001.
- [9] Agilent Technologies; The fundamentals of Signal Analysis.
- [10] Mircea Rades; Dynamics of Machinery I; Editura Printech 2007.
- [11] Mircea Rades; Dynamics of Machinery II; Editura Printech 2009.
- [12] Mircea Rades; Dynamics of Machinery III; Editura Printech 2008.
- [13] Mukesh Vyas; Vibration Monitoring System Basics; Shinkawa Mktg Team Forbes Marshall P Ltd Pune.
- [14] Philippe Vervoort, Les capteurs de vibration mise en perspective, Brüel & Kjaer .
- [15] G. BAUDOIN et J.-F. BERCHER, Transformée de Fourier discrète; École Supérieure d'Ingénieurs en Électrotechnique et Électronique Novembre 2001 – version 0.1
- [16] Simulation numérique du comportement dynamique d'une transmission par engrenages en présence de défauts de dentures Fakhri Chaari, Tahar Fakhfakh et Mohamed Haddar, Mécanique & Industries 6, 625–633(2006) AFM, EDP Sciences 200

Partie B : Analyse des huiles industrielles

Pour optimiser la fiabilité et la disponibilité des équipements et des machines de production, les industrielles réservent un budget important, pour la maintenance et l'entretien de leurs parc matériel. Pour les systèmes hydrauliques, la pureté de l'huile joue un rôle important. L'huile utilisée peut être la cause de dommages aux composants, d'usure accrue et de corrosion du système.

La vérification des lubrifiants fait partie du programme « Equipment Conditioning Monitoring ». En surveillant l'état des machines, d'éventuels problèmes peuvent être détectés à un stade précoce et il est alors possible d'intervenir avant qu'elles ne tombent en panne. La surveillance des huiles de lubrification va encore plus loin, en effet c'est par identification et analyse des causes qu'elle peut remonter à l'origine des pannes. En vérifiant continuellement le niveau de contamination des huiles ainsi que d'autres sources d'usure et de panne des machines, et en maîtrisant le degré de pureté à l'aide de filtres, la machine peut garder son niveau de performance en parfait état de fonctionnement.

Cette partie de l'ouvrage formée de cinq chapitres, expose la technique de surveillance utilisée fréquemment en maintenance prédictive, analyse des huiles, ainsi que sa mise en œuvre.

Le premier chapitre de cet ouvrage est consacré à la présentation générale des huiles industrielles. Les caractéristiques que doivent satisfaire pour assurer leur fonction, leurs compositions et leurs désignations selon les normes les plus adoptés tels les normes ISO, SAE et API.

Le deuxième chapitre traite les différents indicateurs mesurables des huiles comme la viscosité dynamique et cinématique, avec une présentation des équipements industriellement adoptés pour la mesure des caractéristiques physiques des huiles.

Le troisième chapitre porte sur les contaminations des huiles et leurs effets néfastes sur les équipements.

Le quatrième chapitre présente les différentes méthodes d'analyses des huiles, utilisé dans l'industrie et au laboratoire pour la surveillance de l'état de santé des huiles et des équipements.

Le cinquième chapitre est consacré principalement à la méthodologie des prélèvements des échantillons ainsi que le matériel utilisé. Des recommandations pour les prélèvements normalisées sont proposées pour le bon déroulement de l'analyse.

Chapitre 5. Les huiles industrielles

A. Introduction

On trouve les huiles industrielles dans les systèmes hydrauliques, où elles assurent un certain nombre de fonctions vitales. L'huile permet non seulement la transmission de l'énergie hydraulique, mais elle joue aussi le rôle de lubrifiant, nécessaire pour réduire le frottement entre les pièces mécaniques en mouvement. Elle permet aussi la dissipation de la chaleur et l'évacuation, lors des vidanges, des résidus et des particules dues à l'usure.

Les utilisations des huiles sont diverses, on les utilise souvent dans les systèmes hydrauliques tels que Presses hydrauliques ; ainsi que les systèmes de transmission de puissance comme les Réducteurs – Engrenages ; on les trouve aussi dans les moteurs à combustion ; comme les Turbines ; Moteurs industriels ; et dans autres applications : Compresseurs air et frigo ; Groupes électrogènes ; Transformateurs ; Machines-outils ; Circuits de chauffage...

Toutefois il faut noter que les huiles doivent posséder plusieurs propriétés pour remplir correctement ses fonctions.

B. Caractéristiques

La qualité des huiles industrielles doit tenir compte de plusieurs fonctions telles que le pouvoir de lubrification, le pouvoir anti-usure, le coefficient de transfert de chaleur, et la bonne résistance au feu. Cette combinaison permet d'assurer un bon fonctionnement des systèmes mécaniques et d'augmenter la durée de vie de ces composants, de ce fait, augmenter la sûreté de fonctionnement et réduire les coûts de maintenance.

Nombreuses sont les caractéristiques que doivent posséder les huiles industrielles. Cependant, on se contente de citer les suivantes :

- diminuer au maximum les frottements pour limiter l'usure ;
- posséder un excellent pouvoir antiacide et anticorrosion ;
- un pouvoir assez élevé de dispersion thermique ;

- une excellente stabilité, à froid comme à chaud ;
- une fluidité suffisante à froid ;
- une excellente tenue à chaud ;
- une très bonne résistance à l'écrasement ;
- une bonne propriété détergente et dispersante ;

C. Composition des huiles

La plupart des huiles hydrauliques et de lubrification est composée de 80 à 85% d'huiles de base, soit 15 à 20% d'additifs.

1. Les huiles de base

Les huiles de bases peuvent être de plusieurs origines à savoir :

- **Végétales** : Ces huiles sont utilisées pour formuler les lubrifiants biodégradables. Ces huiles manquent généralement de résistance à l'oxydation pour pouvoir être employées dans les systèmes mécaniques.
- **Minérales** : Les huiles de bases minérales sont fabriquées à partir du pétrole brut. Ce sont des mélanges d'hydrocarbures ayant subi de nombreuses opérations de raffinage. Elles sont de très loin les plus utilisées, aussi bien dans les applications automobiles qu'industrielles. Elles présentent des performances moyennes par rapport à un prix peu élevé.
- **Synthétiques** : Sont des produits obtenus par réaction chimique de plusieurs composants. Ce sont des huiles fabriquées par "synthèse" chimique. Elles sont composées tout comme les huiles minérales d'atomes de carbone et d'hydrogène, mais possèdent une structure moléculaire différente offrant un indice de viscosité plus élevé, une perte par évaporation réduite ainsi qu'un meilleur comportement à froid. Deux grandes familles de produits sont utilisées pour la

formulation des lubrifiants : les esters et les hydrocarbures de synthèse. Ces produits présentent une viscosité remarquablement stable quelle que soit la température. Cette propriété est une supériorité majeure sur les bases minérales qui nécessitent l'adjonction d'additifs améliorants de viscosité en plus grande quantité. Leur résistance à l'oxydation est aussi accrue, d'où une plus grande longévité de l'huile qui permet un espacement plus important entre les vidanges.

- **Semi-synthétiques** : Elles résultent d'un mélange d'huiles de base minérales et synthétiques, offrant un bon compromis performances/prix.

2. Les additifs

Les huiles modernes en contiennent entre 15% et 20%, ceux-ci sont indispensables pour améliorer les caractéristiques physico-chimiques des huiles industrielles. Ils sont utilisés pour diminuer l'usure et la friction des composants mécaniques en régimes de fonctionnement et également pour éviter l'accumulation des résidus créés par l'oxydation et les changements chimiques.

- **Les améliorants de viscosité** : ils permettent à l'huile d'être suffisamment fluide à froid et visqueuse à chaud pour éviter le contact des pièces en mouvement. Ces additifs sont des polymères introduits dans une base lubrifiante. Une telle huile est dite multigrade. Les polymères à longue chaîne se contractent à basse température et n'offrent ainsi qu'une résistance négligeable au mouvement des molécules d'huile mais, à haute température, ils se déroulent et s'opposent à la fluidification du mélange.

- **Les additifs anti-usures** : ils renforcent l'action anti-usure qu'exerce un lubrifiant vis-à-vis des organes qu'il lubrifie. Ils agissent par la formation d'un film protecteur, en réagissant directement ou par l'intermédiaire de leur produit de réaction avec les surfaces métalliques.
- **Les additifs antioxydants** : Permet de ralentir les phénomènes d'oxydation du lubrifiant et par suite contribuent à l'espacement des vidanges par une meilleure tenue aux hautes températures.
- **Les additifs détergents** : Les additifs les plus récents sont des polymères de composés basiques azotés qui ne laissent pas de cendres. Ils évitent la formation de dépôts sur les parties les plus chaudes des moteurs tels que les gorges des pistons. Ils exercent une action détergente, en particulier à l'intérieur des moteurs où ils empêchent la formation des dépôts ou des gommages sur les surfaces métalliques à partir des résidus carbonneux de combustion ou composés oxydés. Ces huiles détergentes doivent être utilisées avec précaution dans les moteurs anciens car leur capacité à nettoyer les dépôts déjà sédimentés dans les carters (la calamine par exemple) peut entraîner l'obturation des canaux de circulation du lubrifiant.
- **Les additifs dispersants** : ils maintiennent en suspension toutes les impuretés solides formées au cours de fonctionnement du moteur tels que boues, imbrûlés, gommages, suies diesel et dépôts nettoyés par les détergents. Ils empêchent les résidus solides de s'agglomérer et ainsi limitent le risque de dépôt (boues) dans les parties froides du moteur (carter).

- **Les additifs de basicité** : ils neutralisent les résidus acides de combustion des carburants, au fur et à mesure de leur formation sur moteur diesel.
- **Les additifs anti-corrosions** : ils empêchent l'attaque des métaux ferreux, qui est due à l'action conjuguée de l'eau, de l'oxygène de l'air et de certains oxydes, formés lors de la combustion. Ils forment un film protecteur ou une passivation de la surface à protéger.
- **Les additifs anti-congélations** : ils permettent au lubrifiant de garder une bonne fluidité à basse température (de -15°C à -45°C).
- **Les additifs anti-mousse** : le moussage de l'huile peut être dû à la présence d'autre additifs comme les additifs détergents qui agissent dans l'huile comme du savon dans l'eau, ils nettoient le moteur mais ont tendance à mousser le circuit de graissage et provoque des turbulences lors de l'écoulement du lubrifiant, facilitant ainsi le brassage air huile et la formation des bulles. Ces additifs ont pour but de limiter la dispersion d'un grand volume d'air dans l'huile.
- **Les additifs d'extrême pression** : ils ont pour but de réduire les couples de frottement et par conséquence économiser l'énergie et de protéger les surfaces des fortes charges. Ils apportent au lubrifiant des propriétés de glissement spécifiques, en particulier aux organes équipés d'engrenages ou de garnitures de friction travaillant dans l'huile (ponts auto bloquants, boîtes de vitesse, manuelles ou automatiques, freins immergés, etc.).

Chaque additif possède une fonction propre permettant l'amélioration des caractéristiques de l'huile.

Quelques exemples ont consignés dans le tableau ci-dessous:

Tableau 5-1 : Additifs et leurs fonctions

Additifs	Fonctions
Phénol, phénate	Antioxydant, empêchant l'oxydation de l'huile à haute température en contact avec l'air.
Zinc, esters phosphoriques	Anti usure permettant la formation d'une couche qui protège contre l'usure en évitant le contact direct avec les surfaces.
Silicone	Anti mousse, limite la formation de la mousse suite aux conditions d'utilisation

L'association de plusieurs additifs des huiles pourrait subsister aux besoins et remplir les fonctions suivantes :

- **protéger l'huile** : Les antioxydants retardent le phénomène d'oxydation qui se produit lorsque l'huile chauffe en présence d'oxygène. Les anti-mousse évitent (comme leur nom l'indique) la formation d'écume et améliorent le pompage de l'huile.
- **protéger le moteur** : Les anticorrosifs agissent sur la surface du métal pour prévenir la corrosion provoquée par l'oxydation des huiles et la combustion du soufre, les antirouilles isolent le métal de l'eau de condensation et les anti-usures augmentent la résistance à la rupture du film d'huile pour éviter le contact métal-métal.
- **nettoyer le moteur** : Les additifs détergents-dispersants nettoient et maintiennent les impuretés en suspension dans l'huile, afin d'éviter leur agglomération.
- **améliorer les caractéristiques de l'huile** : Les antigels abaissent le point de congélation de l'huile tandis que d'autres additifs améliorent l'indice de viscosité (huiles multigrades).

D. Classification des huiles

1. Huile hydraulique Norme ISO-NF

La norme ISO - NF désigne une huile par un grade et un service rendu par cette huile (ou domaine d'application).

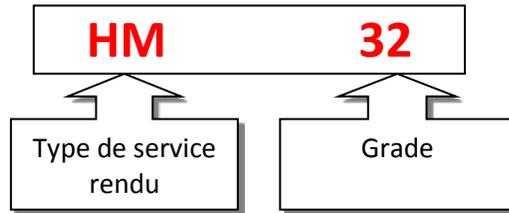


Tableau 5-2: Grade selon ISO NF

ISO NF ν (mm ² s ⁻¹)	10	15	22	32	46	68	100	150	220	320
--	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----

La viscosité cinématique indiquée dans le grade est fixée à 40°C.

Catégories courantes d'huile pour circuits hydrauliques

- **HL** : huiles minérales + propriétés anti-oxydantes et anticorrosion particulières. Elles présentent un bon comportement vis-à-vis de l'eau. Elles sont préconisées dans les installations à moyenne pression lorsque des additifs anti-usures ne sont pas nécessaires.
- **HM** : fluides HL + propriétés anti-usure particulières.
- **HV** : fluides HM + propriétés viscosité/température améliorées.
- Les fluides HM et HV sont les plus utilisés.
- **HG** : fluides HM + propriétés anti stick-slip (pour glissières de machines-outils).
- **HSx** : fluides de synthèse.
- **HFxx** : fluides difficilement inflammables. Les fluides HFC sont les plus utilisés.

2. Huiles moteurs et boîtes de vitesses Normes SAE

a) Huile mono grade SAE

Pour déterminer la qualité ou la viscosité d'une huile il existe plusieurs normes, la norme SAE (Society of Automotive Engineers), la plus connue en Europe indique la viscosité du lubrifiant par un numéro (exemple 30), plus le chiffre est bas, plus l'huile est fluide, au contraire, plus le chiffre est élevé plus elle sera visqueuse, (une 20 sera donc plus fluide qu'une 40).



Figure 5-1 : Désignation des huiles mono grade SAE

b) Huile multigrade

Pour les huiles multigrades on emploie une formule (par exemple 5W30). Le/les deux chiffres avant le W (Winter) donnent le degré de viscosité en hiver et les deux autres, celui de l'été.

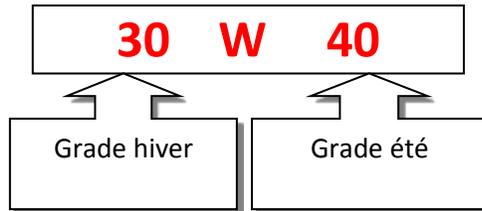


Figure 5-2 : Désignation des huiles multigrade SAE

Plus le nombre avant le W est bas, plus l'huile restera fluide par température basse (une 5W est donc meilleure qu'une 20W et qu'une 15W). Pour les chiffres été, après le W, plus ils seront élevés, plus l'huile conservera sa viscosité à chaud (40 est donc plus visqueux que 30).

On peut considérer que, généralement :

- 5W40 est une huile synthétique ;
- 10W40 une semi-synthétique ;
- 15W40 une minérale.

3. Huiles moteurs et transmission Normes API

La désignation pour ces huiles du service API permet de connaître les performances de l'huile ainsi désignée.

Pour les huiles moteur, le service API s'indique avec deux lettres, la première indique le type de carburant utilisé dans le moteur (S = essence et C = Diesel), la deuxième indique la performance elle-même, plus la lettre est élevée dans l'alphabet et plus la performance est importante.

a) *Classification API Moteur Essence [7]*

SD	Compatible avec les moteurs à essence de voitures de tourisme et de camions fabriqués entre 1968 et 1970. Une huile de type SC doit avoir la propriété de détergence pour une protection contre la formation de dépôts à haute et à basse température. Egalement une protection supplémentaire est requise contre l'usure et la formation de rouille.
SE	Pour les moteurs à essence de voiture de tourisme et de camions fabriqués depuis 1971. Les huiles SE peuvent remplacer les huiles SC. Par rapport à la catégorie précédente, l'huile SC offre une meilleure résistance contre l'oxydation et contre la formation de "cold sludge" (boues froid) à basse température. En plus, le moteur est mieux protégé contre la formation de rouille.
SF	Pour les moteurs à essence des voitures de tourisme et de certains camions fabriqués depuis 1980. Les huiles SF peuvent remplacer les huiles SE et SC. Les huiles SF ont de meilleures performances que les huiles SE en matière de résistance au vieillissement et de protection contre l'usure.
SG	Pour les moteurs à essence des voitures de tourisme et de certains camions fabriqués depuis 1989. Les huiles SG peuvent remplacer les huiles SF, SC, SE ou SE/CC. Les huiles SG ont de meilleures performances que les huiles SF sur le plan de la résistance à la formation de dépôts, de la protection contre l'usure et de la résistance contre la corrosion.
SH	Identique à SG mais avec des conditions de tests plus sévères.

SI	Même caractéristiques que l'huile moteur de niveau SH, mais développée en accord avec les systèmes de certification API suivant des critères d'essais multiples.
-----------	--

b) Classification API Moteur Diesel [7]

CC	Préconisée pour les moteurs diesel légèrement suralimenté avec une description de service normal et les moteurs à essence aussi. Les huiles CC sont très détergentes et dispersives et protègent conformément les moteurs contre l'usure et la corrosion.
CD	Recommandé pour les moteurs diesel fortement sollicités, à haut régime et soumis à des pressions effectives moyennes élevées, produites par turbo compression. Les huiles CD sont très détergentes et dispersives et protègent suffisamment les moteurs contre l'usure et la corrosion.
CDII	Conseillé pour les moteurs diesel deux temps conçus pour des services sévères. Elles assurent la limitation stricte de la formation de dépôts et de l'usure et répondent aux exigences de la classe CD présentée ci-avant.
CE	Pour les moteurs diesel très sollicités avec turbo compression en circulation depuis 1983. Ces huiles sont destinées pour les moteurs de puissance élevée à régime élevé mais pareillement pour les moteurs lents qui développent une puissance élevée. Les huiles CE peuvent remplacer les huiles CD sur tous les moteurs. De plus les exigences de la catégorie CD, ces huiles ont de meilleures propriétés en matière de limitation de la consommation d'huile, de formation de dépôts, d'usure et d'épaississement de l'huile.
CF	Possède les même caractéristique que la catégorie CE avec addition d'un test de micro oxydation. La protection des pistons et des gorges de segment est particulièrement renforcée.

CG	Pour les moteurs diesel fortement sollicités. Ces huiles permettent la réduction des dépôts sur les pistons, de l'usure, de la corrosion, du moussage, de l'oxydation et de l'accumulation de suies à haute température. Elles répondent aussi aux besoins des moteurs adaptés aux normes d'émission 1994.
CH	Pour les moteurs diesel adaptés aux normes d'émission 1998. Ces huiles permettent une augmentation des intervalles de vidange. Elles sont destinées à garantir la durée de vie des moteurs dans les conditions les plus sévères.

c) Classification API transmission [7]

API-GL-1	Pour transmissions d'essieux à denture hélicoïdale et à vis sans fin et certaines transmissions manuelles. Ces huiles peuvent contenir des additifs antirouille, antioxydant, antimousse et agent abaissant le point de solidification.
API-GL-2	Pour transmissions à vis sans fin auxquelles une huile GL-1 n'est pas suffisante.
API-GL-3	Pour transmissions d'essieux à denture hélicoïdale fonctionnant à vitesse modérée et service moyen auxquelles une huile GL-1 ne suffit pas.
API-GL-4	Pour transmissions à denture hélicoïdale et transmissions hypoïdes spéciales appliquées à des véhicules qui fonctionnent dans des conditions de vitesse élevée et de faible couple ou de vitesse réduite et de couple élevé. Des additives anti-usures et extrême-pression sont fréquemment ajoutés.
API-GL-5	Même caractéristiques que le précédent mais dans des conditions de vitesse plus élevée, sollicitation extrêmement faible, couple et vitesse réduite et couple élevé. Des additives anti-usures et extrême-pression sont très souvent ajoutés

Chapitre 6. Caractérisation physico-chimique

A. La viscosité

La viscosité caractérise les forces de frottement qui interviennent entre les molécules d'un fluide seulement quand celles-ci sont en mouvement les unes par rapport aux autres. La fluidité est la propriété inverse de la viscosité.

La méthode la plus courante pour mesurer la viscosité est celle d'Engler. Cette méthode consiste à comparer la vitesse d'écoulement d'un certain volume d'huile à celle d'écoulement d'un même volume d'eau par un trou de petit diamètre (1 mm, par exemple).

On considère l'expérience suivante où le mouvement de cisaillement que subit le fluide peut être considéré comme laminaire plan :

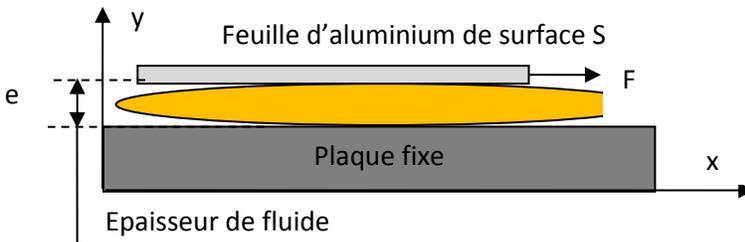


Figure 6-1 : Détermination de théorie de la viscosité

On tire sur la feuille d'aluminium afin que celle-ci soit animée de la vitesse V_0 . On montre que V_0 augmente avec F , avec e et diminue avec S .

On définit ainsi :

$$\text{Contrainte de cisaillement : } \tau = \frac{F}{S}$$

$$\text{Déformation de cisaillement : } \gamma = \frac{dx}{dy}$$

Vitesse de cisaillement : $\dot{\gamma} = \frac{dx}{dy}$

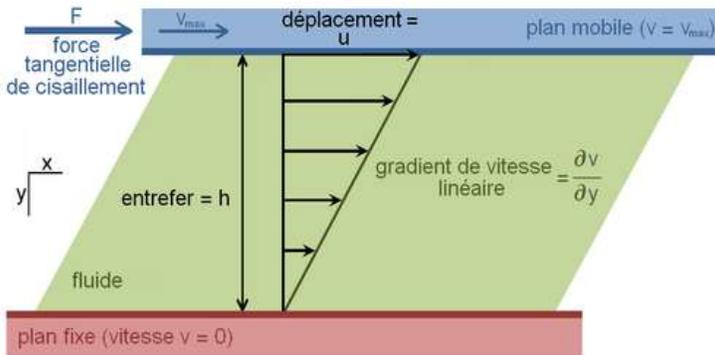


Figure 6-2 : Modélisation du comportement des fluides [6]

1. La viscosité dynamique

On appelle viscosité dynamique la grandeur : $\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$ la façon dont τ varie en fonction de $\dot{\gamma}$ dépend de la viscosité.

- Unité : Pa.s (Pascal seconde) ou poiseuille dans le système international. (Symbole PI)
- Unité usuelle : le poise : 1 poise = 1 /10 PI (symbole Po)

2. La viscosité cinématique

La viscosité cinématique peut s'exprimer en centistokes (cSt) ou en Saybolt Universal Second (SUS). La viscosité cinématique est une mesure de la résistance d'un fluide à l'écoulement sous l'effet de la gravité. La viscosité est toujours mesurée à une température donnée:

- cSt (ou mm^2/s) à 40 et/ou 100°C
- SUS (ou SSU) à 100 et/ou 210°F

Cette grandeur est donnée par : $\nu = \frac{\tau}{\rho}$ Où ρ est la masse volumique du fluide.

- Unité dans le système international : $\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^3$, on montre que c'est aussi le $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$.
- Unité usuelle : 1 Stoke = $10^{-4} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ou son sous-multiple, le centistoke.

3. Indice de viscosité (IV)

L'indice de viscosité (VI) est une mesure arbitraire pour le changement de la viscosité avec les variations de température. Il est utilisé pour caractériser les changements de viscosité par rapport à la température dans une huile lubrifiante.

Les meilleures huiles ayant la plus forte IV. L'huile restera stable et sa viscosité ne varie pas beaucoup sur toute la plage de température. La performance du moteur restera conforme dans des conditions de travail normales.

Pour les huiles industrielles, fonctionnant souvent à une température plus ou moins stable, l'utilisation d'une huile mono grade à $\text{IV} = 100$ est courante.

Par contre, pour un moteur subissant des écarts de température dépassant 100°C , une huile multigrade à haut IV (> 140) est recherchée.

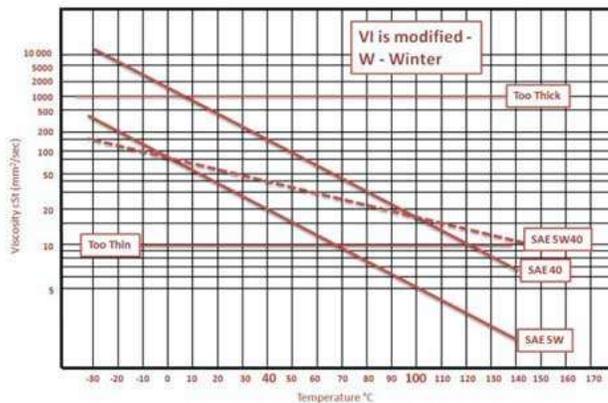


Figure 6-3 : Comparaison de l'IV des huiles mono grade et multigrade

Ci-dessus un abaque comparant quelques huiles moteur, on remarque que les huiles multigrades ont un IV plus fort que les autres, car elles imposent des impératifs de viscosité à froid et à chaud.

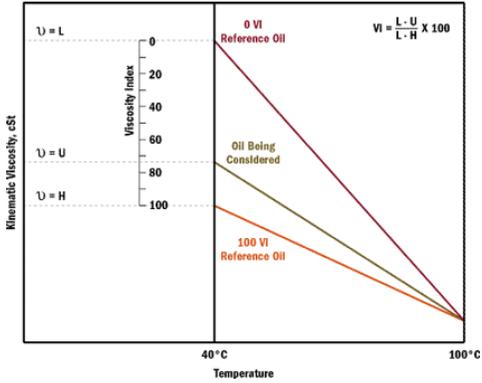


Figure 6-4 : Détermination de l'IV

L'indice de viscosité peut être calculé en utilisant la formule suivante:

$$IV = 100 \frac{L-U}{L-H}$$

Avec U la viscosité cinématique à 40°C et L et H sont des différentes valeurs en fonction de la viscosité cinématique à 100°C. (Voir Annexe

Grade ISO	Viscosité cinématique médiane à 40 °C	Limites de viscosité	
		minimum	maximum
2	2,2	1,90	2,42
3	3,2	2,88	3,52
5	4,6	1,14	5,06
7	6,8	6,12	7,48
10	10	9,00	11,00
15	15	13,50	16,50
22	22	19,00	24,20
32	32	28,80	35,20
46	46	41,40	50,60
68	68	61,20	74,80
100	100	90,00	110,00
150	150	135,00	165,00
220	220	198,00	242,00
320	320	288,00	352,00

Tableau 0-2)

L'indice de viscosité d'une huile dont la viscosité cinématique 40 cSt à 40°C et 10 cSt à 100°C est calculée en déterminant les valeurs de L et H d'après le tableau en annexe. Pour une viscosité de 10 cSt à 100°C L=147.7 cSt et H=82.87 cSt d'où :

$$IV = 100 \frac{L-U}{L-H} = 100 \times \frac{147.7-40}{82.87-40} = 251$$

B. Le point d'éclair et de congélation

Le point d'éclair est la température à laquelle l'huile émet des vapeurs. Ces vapeurs risquent de s'enflammer. La température d'inflammation est environ : 200°C à 250°C.

Le point éclair n'est mesuré que si la viscosité subit une forte chute, et sur un moteur diesel uniquement. Il donne la température à laquelle les vapeurs d'huile brûlent au contact d'une flamme. Comme pour la viscosité, le point éclair de l'huile usagée s'interprète par rapport à celui de l'huile neuve. Augmentation du point éclair signifie une haute température de fonctionnement. Diminution du point éclair signifie la présence de combustible imbrûlé ou la présence anormale de solvant divers.

Le point de congélation est la température où l'huile ne s'écoule plus. Elle doit être la plus basse possible. Pour les régions tempérées, cette température est de l'ordre de -25°C à -20°C.

C. Conductivité électrique

La conductivité électrique est une mesure de chargeabilité électrostatique d'un fluide. Elle est généralement exprimée en pico Siemens par mètre (pS/m)[6]. En plus du type de fluide, la conductivité dépend aussi de la concentration des porteurs de charge mobiles. Par exemple, l'eau distillée pure est uniquement légèrement conducteur. Cependant, si l'eau contient des impuretés telles que des sels, des acides ou des bases, puis sa conductivité augmente.

Les lubrifiants sont normalement légèrement conducteurs, par conséquent ils ne peuvent pas être utilisés comme isolants dans les transformateurs. Idem, les huiles peuvent également conduire le courant

électrique. Leur conductivité dépend de plusieurs facteurs différents, y compris l'huile de base, les additifs et la polarité.

Afin de prévenir les dommages causés par les décharges électrostatiques, la conductivité de l'huile doit être identifiée.

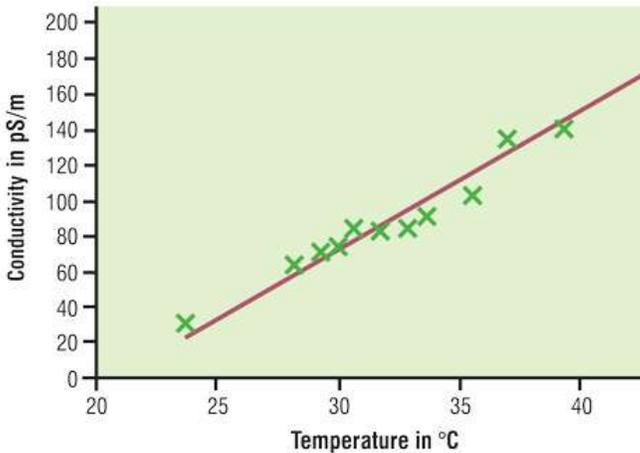


Figure 6-5 : Conductivité électrique vs Température [1]

Comme mentionné précédemment, la valeur de la conductivité de l'huile est mesurée en pS/m. Si la conductivité est inférieure à 400 pS/m à 20 °C, il y a peu de risque de détérioration du système par de charges électrostatiques de l'huile. Cependant, si elle dépasse cette valeur, il y a une possibilité très réelle que le phénomène se produise.

D. Mesure de la viscosité

1. Viscosimètre capillaire

Le principe consiste à mesurer le temps d'écoulement du fluide entre deux repères du tube capillaire situé sous le réservoir. Cette information, associée aux dimensions du tube permet de calculer la viscosité cinématique.

Le principe du viscosimètre à tube capillaire est basé sur l'application de l'équation de Poiseuille.

Cette équation permet de calculer la viscosité d'un fluide traversant un tube de section circulaire (normalement un capillaire mince).

$$\mu = \frac{\pi \times a^4 \times \Delta P}{8 \times Q \times L}$$

Avec:

a : Rayon du tube,

ΔP : Chute de pression le long du tube,

Q : Débit volumique du fluide (par unité de temps),

L : Longueur du tube.

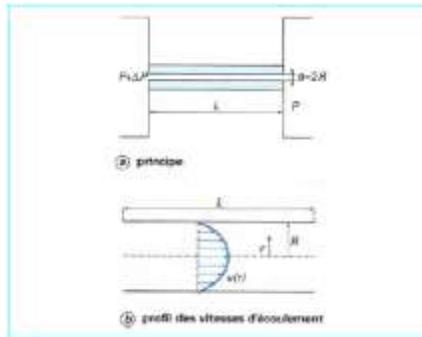


Figure 6-6 : Viscosimètre capillaire [3]

2. Viscosimètre à coupe

Appelé aussi coupe de viscosité, il permet la mesure du temps d'écoulement d'une certaine quantité d'huile contenue dans une coupe à travers un orifice calibré percé à sa base. Un nomogramme permet à partir de ce temps d'obtenir la viscosité cinématique. Le résultat obtenu par cette méthode est bien adapté vue sa précision et ses résultats normalisés. Les coupes peuvent être chauffées pour des mesures de viscosité à différentes températures (mesure de IV).

1. Rhéomètre

Un rhéomètre est un appareil de laboratoire capable de faire des mesures relatives à la rhéologie d'un fluide. Le principe consiste à appliquer un cisaillement à l'échantillon, il permet d'étudier fondamentalement les

propriétés d'écoulement d'un liquide, ou d'une pâte, en réponse à une force appliquée.

Un rhéomètre est plus sophistiqué qu'un viscosimètre. Il permet de connaître des grandeurs fondamentales telles que la viscosité, le taux de cisaillement $\dot{\tau}(t)$ et la contrainte de cisaillement $\tau(t)$.

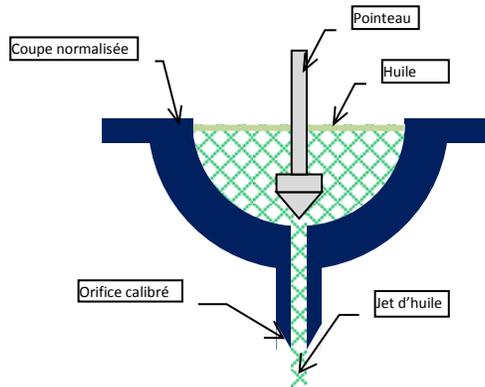


Figure 6-7 : Viscosimètre à coupe

Les rhéomètres rotatifs sont les plus utilisés. Pour ce type de rhéomètre, le produit étudié remplit l'espace entre deux pièces coaxiales (le rotor et le stator). Le rapport entre le couple de rotation $M(t)$ transmis d'une pièce à l'autre par la substance cisailée, et la vitesse de rotation $\Omega(t)$ du rotor, donne la viscosité, à une constante géométrique près. On distingue les appareils à vitesse de rotation imposée, et ce sont les plus fréquents et ceux à couple imposé.

Cette méthode permet de dégager plusieurs mesures à savoir :

- Le couple sur le rotor,
- la viscosité dynamique, μ ou η , en fonction de la température, du temps, etc. ;
- la contrainte tangentielle $\tau(t)$ en fonction de $\dot{\tau}(t)$

De la valeur du couple mesuré on déduit la viscosité dynamique. Le bol peut également être chauffé pour des essais à température

Dotée d'une grande précision, cet appareil est peu employé pour les huiles dans l'industrie, car son utilisation est plus délicate et son prix est important.

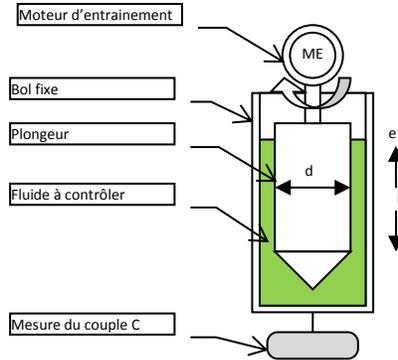


Figure 6-8 : Rhéomètre

2. Viscosimètre à chute de bille

Le principe consiste à mesurer le temps de chute d'une bille roulant et glissant dans un tube cylindrique incliné rempli de la substance à mesurer. On mesure au chronomètre le temps nécessaire pour que la bille parcoure une distance définie

Par retournement du cylindre, on peut aussi utiliser le temps de retour de la bille comme mesure de contrôle. Les résultats sont donnés en viscosité dynamique (en mPa.s).

$$\mu = \frac{2 \times a^2 \times (\rho_s - \rho) \times g}{9 \times v}$$

Avec:

a : rayon de la sphère; v : vitesse de la sphère; ρ_s : masse volumique de la sphère; ρ : masse volumique du fluide; g : accélération due à la pesanteur; t : temps de chute.

3. Viscosimètre à billes

On compare la vitesse de descente de deux billes dans deux tubes contenant respectivement, l'un l'huile à contrôler et l'autre une huile de référence.

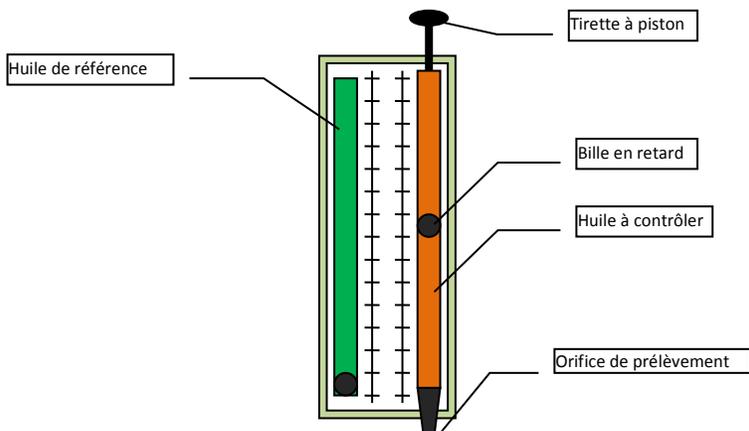


Figure 6-9 : Viscosimètre à bille

On lit directement la viscosité cinématique en face de la bille restée en retard. L'échelle proposée permet de connaître directement la viscosité à 40°C pour en déduire le grade ISO (ou à 100°C pour le grade SAE). Deux appareils distincts sont nécessaires, un pour les huiles industrielles à IV = 100 et un autre pour les huiles moteurs à IV = 150. Il faut faire très attention à ce que les températures des deux tubes soient identiques. Ce type de viscosimètre est bon marché et pratique d'emploi sur le terrain, cependant les résultats lus sont peu précis et non normalisés.

Chapitre 7. Dégradation des huiles

A. Introduction

L'analyse d'huile usagée permet d'avoir rapidement une idée détaillée non seulement sur l'état du lubrifiant mais également sur l'état de santé de l'équipement.



Les résultats de l'analyse combinés à l'expertise des diagnostiqueurs et l'exploitation d'une base de données sont les éléments clef du diagnostic.

L'objectif donc sera de déceler les principales anomalies afin de donner au responsable maintenance des informations précises sur l'état de santé de la machine, et cela en recherchant dans le lubrifiant :

- Tous les phénomènes de pollution ;
- Tous les phénomènes de contamination ;
- L'ensemble des métaux provenant de l'usure ;
- La qualité de la combustion, dans les moteurs ;
- l'état du lubrifiant, lorsque les vidanges sont espacées.

B. Dégradation des huiles

1. TAN (indice d'acide)

La mesure du TAN (indice d'acide) renseigne également sur l'état de l'huile. C'est une détermination importante dans l'analyse du fluide. Les additifs, en vieillissant, voient leur acidité spécifique naturelle diminuer. Parallèlement l'huile, en s'oxydant, fait évoluer le TAN jusqu'à un certain point où sa dégradation s'accélère très rapidement et provoque une augmentation importante de l'indice d'acide.

Il en résulte une courbe de l'évolution du TAN en fonction du temps d'utilisation

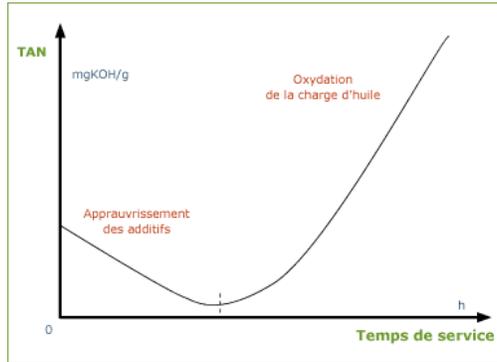


Figure 7-1 : Evolution du (Total Acid Number)

Le nombre d'acide initial d'une huile neuve est déterminé par la quantité d'acide présente en elle. Donc, en supposant que la nouvelle huile de pétrole ou de frais a un indice d'acide de départ comprise entre 0,5 et 1,00 mg de KOH / g, alors il serait généralement recommandé de changer l'huile lorsque l'indice d'acide est quatre fois supérieur à l'indice d'acide de l'huile de départ. Ainsi, une huile avec un indice d'acide initial de 1,00 mg de KOH / g doit être changé lorsque le résultat du test de l'indice d'acide est de 4,00 mg KOH / g ou plus.

2. Oxydation

Il est largement reconnu que l'oxydation est le principal mécanisme de dégradation du lubrifiant. Il est aussi largement connu que l'huile oxydée ne peut pas lubrifier efficacement les machines. Les tests d'analyse d'huile comme (Total Acid Number) et FTIR-oxydation peuvent révéler l'oxydation anormale.

Il est important pour les techniciens de lubrification et d'analyse de l'huile, de comprendre comment l'oxydation du lubrifiant est mesurée, et comment ces tests peuvent être mieux appliqués pour surveiller la performance du lubrifiant. Une meilleure compréhension de l'oxydation de lubrification permettra aux techniciens de prendre des décisions éclairées pour assurer une bonne lubrification.

La dégradation se produit par oxydation sous l'action de la température élevée et de l'oxygène. Les produits d'oxydation entraînent une modification des caractéristiques des lubrifiants.

L'oxydation des huiles est favorisée généralement par l'élévation de la température des conditions de fonctionnement des huiles. Pour l'amélioration de la durée de vie des lubrifiants on préconise une température inférieure à 60° C et en évitant l'aération du fluide.

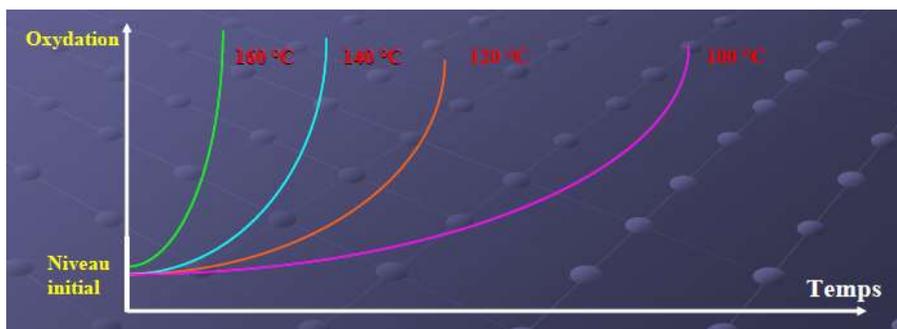


Figure 7-2 : Degré d'oxydation en fonction de la température

FTIR signifie Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Il est souvent simplement appelé un «test infrarouge ». Il nous permet d'obtenir une image de l'état de santé d'une huile et également si des contaminants sont présents tels que le carburant ou du liquide de refroidissement.

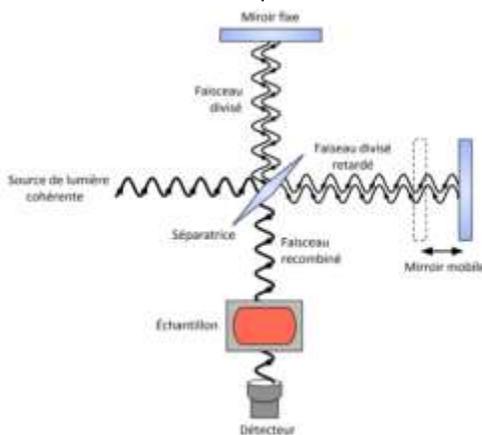


Figure 7-3 : Principe de Fourier Transform Infrared Spectroscopy [6]

Tout d'abord, un échantillon de l'huile neuve est testé pour déterminer une base de lecture.

Ensuite, un échantillon de l'huile utilisée est testé. Les Contaminants de l'huile et des molécules d'additifs vont absorber une partie du rayonnement infrarouge, mais seulement à certaines fréquences. Suie et d'autres particules absorbent le rayonnement à toutes les fréquences.

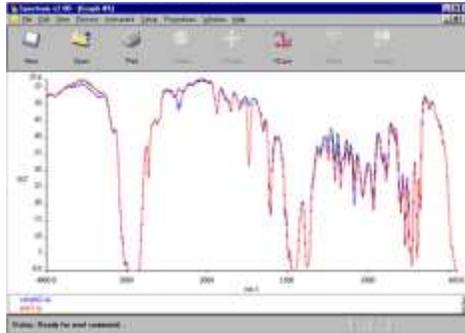


Figure 7-4 : Un spectre infrarouge typique

Après le test à l'huile, le spectre de fréquences de l'huile utilisée est comparé à celle de la nouvelle huile de «référence» testé au préalable. Nous pouvons alors voir comment l'état de l'huile a changé depuis son état vierge à son état utilisé et faire les recommandations nécessaires.

3. Variation de la viscosité avec la température

La viscosité de l'huile diminue avec l'élévation de la température.

La qualité d'une huile est d'avoir un degré de viscosité suffisant pour assurer un frottement fluide aux températures de fonctionnement des organes du moteur : de 80°C à 150°C.

La variation de la viscosité cinématique d'une huile est formulée par l'équation Walther selon la norme ASTM D341 :

$$\log(\log(\nu + 0.7)) = A - B \log(T)$$

Avec A et B sont des constantes inconnues qui peuvent être résolu à partir de deux points de données (ν_1, T_1) et (ν_2, T_2) . Avec ν exprimé en cSt et T en Kelvin.

$$\begin{cases} \log(\log(\nu_1 + 0.7)) = A - B \log(T_1) \\ \log(\log(\nu_2 + 0.7)) = A - B \log(T_2) \end{cases}$$

A et B sont déduits des équations précédentes.

$$\begin{cases} B = \frac{\log(\log(\nu_1 + 0.7)) - \log(\log(\nu_2 + 0.7))}{\log(T_2) - \log(T_1)} \\ A = \log(\log(\nu_1 + 0.7)) + B \log(T_1) \end{cases}$$

Donc pour une valeur de T on a :

$$\nu = 10^{(10^{(A - B \log(T))})} - 0.7$$

Pour les liquides et les pâtes, la variation de la viscosité avec la température est opposée à celle observée pour les gaz : ν décroît lorsque T augmente.

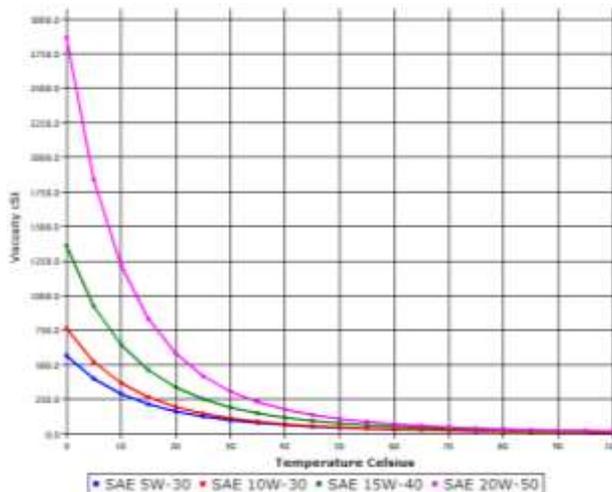


Figure 7-5 : Viscosité vs Température

4. Pouvoir détergeant

C'est le pouvoir dispersant de l'huile. Il consiste à évaluer qualitativement la capacité de l'huile à entraîner les matières charbonneuses et les résidus pour éviter le colmatage, qu'elle contient vers la périphérie lors de son écoulement. Son principe est contrôlé par la diffusion d'une goutte d'huile sur un papier filtre observée après une durée de 24 heures.

C. Contamination des lubrifiants

Il est produit par les débris d'usure d'organes de la machine ou par un autre fluide (eau de refroidissement, carburant...)

1. Contamination par des particules solides

Les particules sont destructrices pour les composants lubrifiés. La filtration joue un rôle clé dans l'extraction des particules et la prévention de l'usure. Un filtre moderne peut extraire des particules d'une dimension aussi faible que 3 μm .

Il est difficile de bien apprécier les très faibles dimensions des particules destructrices qui causent des ravages dans les équipements lubrifiés.

2. Contamination par l'humidité (Teneur en eau)

Une présence d'eau peut avoir différentes conséquences nocives aussi bien sur les propriétés de l'huile, que sur le matériel lubrifié.

La contamination par l'humidité favorise certaines réactions chimiques sur les additifs de la formule telles que :

- La corrosion des parties mécaniques
- La création d'une émulsion.
- Une oxydation éventuelle....

La détermination de la teneur en eau est obtenue par :

- Décantation, filtration, centrifugation, purge, vidange partielle ou totale ...)
- La méthode KARL FISCHER : Elle permet de doser des traces d'eau et est basée sur une réaction avec une solution iodée conductrice (dosage électrochimique).

C'est à partir d'une teneur de 0.05 % d'eau que l'on peut détecter, visuellement, une présence d'eau (aspect trouble de l'échantillon). La méthode de Karl Fischer permet de doser des traces d'eau jusqu'à quelques ppm (0.0001%).

La présence d'eau dans un circuit hydraulique provoque des dégâts graves tel que, oxydation, destruction des additifs, colmatage des filtres... Cette eau provient généralement d'une condensation (dans la bêche, par exemple), mais aussi de pénétration par les joints (vérins, arbres de moteur...). La teneur maximale généralement tolérée est de 0,05%.

Le contrôle de l'eau en suspension se fait chimiquement: on ajoute un produit qui dégage un gaz, proportionnellement à la quantité d'eau. La quantité de gaz dégagé indique la teneur en eau.

Un procédé plus rustique, mais pratique sur un chantier, consiste à mettre une goutte d'huile sur une plaque fortement chauffé (150 à 200°C); si l'huile "crépète", alors la teneur en eau est inacceptable. Ce procédé rudimentaire ne donne bien entendu qu'un ordre d'idée et demande un peu d'expérience (et une bonne vue).

D. Effet de la contamination

1. Usure par abrasion

La plupart des composants sont en contact avec l'huile si elle contient des particules plus grandes que le jeu de fonctionnement les taux d'usure seront importants.

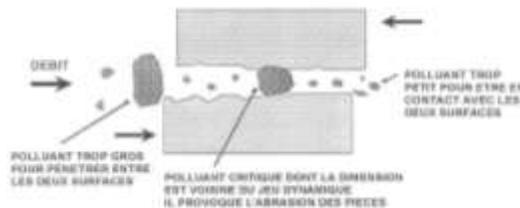


Figure 7-6 : Usure des composants par abrasion

2. Usure par fatigue

Les particules dont les dimensions sont voisines des jeux s'introduisent notamment dans les roulements et paliers et provoquent une dégradation par fatigue.

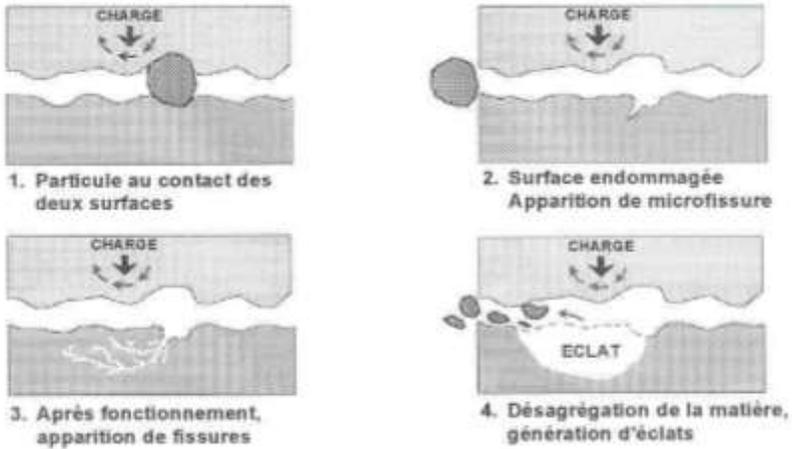


Figure 7-7 : Usure des organes mécanique par fatigue

3. Usure par érosion

L'usure par érosion est causée par des particules qui atteignent la surface d'un composant avec une vitesse élevée. Elle provoque la dégradation des distributeurs et des servovalves.

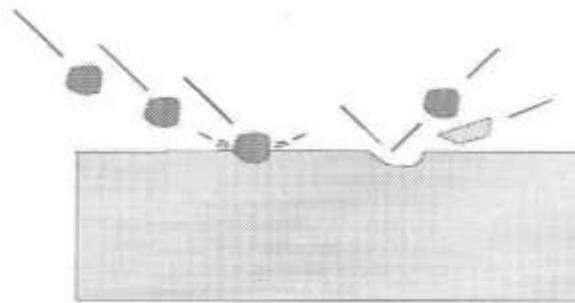


Figure 7-8 : Dégradation par érosion

4. Usure par adhérence

Les composants possèdent des surfaces de contact qui ne sont pas parfaitement planes. Des microsoudures peuvent se produire à ces endroits lorsqu'il y a rupture du film lubrifiant.

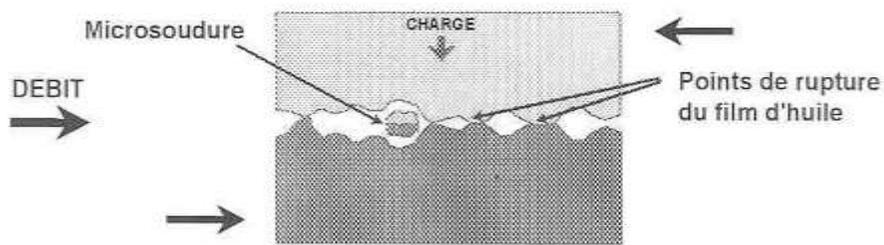


Figure 7-9 : Usure par adhérence

Chapitre 8. Méthodes d'analyse

A. Tache sur buvard

La méthode consiste à déposer une ou deux gouttes d'huile sur un buvard approprié à l'aide d'une pipette. Selon le type d'huile, le buvard peut prendre de 15 minutes à 12 heures pour sécher avant l'observation. Cette technique permet de

- Déterminer le niveau d'oxydation et l'acidité dans les huiles industrielles.
- Déterminer la dispersion dans l'huile moteur diesel.
- Indiquer la nature de la contamination (par l'eau, le glycol ou le carburant).

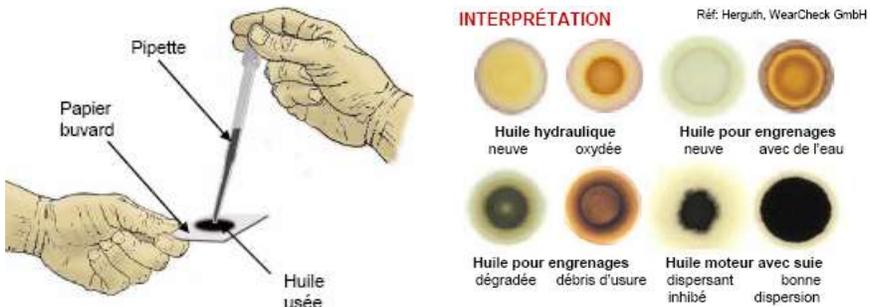


Figure 8-1 : Détection de la contamination sur papier buvard

B. Le comptage de particules

En automatique, ce test consiste à faire passer une petite quantité de fluide dans une fenêtre ou chaque particule présente va générer une ombre en présence d'une lumière. Un capteur va compter, définir une dimension pour chaque ombre et faire un classement.

1. Définition de la taille des particules

Jusqu'au 1992 l'étalonnage de machine compteur de particules on utilise la poussière de test la norme ACTFD (Air Cleaner Fine Test Dust) (ISO

4402 :1991). Depuis 1997, la norme ISO 12103-A3 prévoit une nouvelle poussière de test ISO MTD (Medium Test Dust). La poussière de test ISO MDT est utilisée pour l'étalonnage de compteurs de particules automatiques dans la cadre des normes de l'étalonnage ISO 11171 :1999 et ISO 11943 :1999.

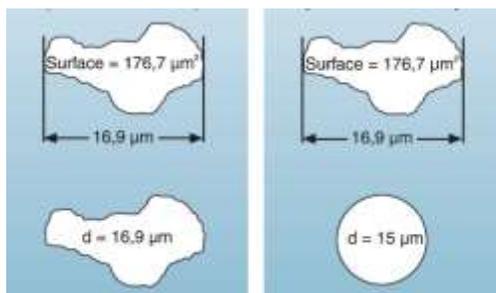


Figure 8-2 : Définition de la taille des particules

a-ACTFD (ISO 4402 :1991) b-ISO MTD (ISO 1171 :1999)

Dans le cas de la poussière ACFTD, la grandeur utilisée pour définir la taille et la longueur la plus importante des particules.

L'introduction de la nouvelle norme ISO 11171 :1999 prévoit une nouvelle définition de la taille des particules. La norme définit comme taille de particules le diamètre d'une particule de poussière ISO MTD de surface identique.

2. Comptage optique

Le comptage optique des polluants présents se fait sur une membrane après filtration. Il renseigne sur : La taille, le nombre, la forme et la nature des particules.

Le comptage au microscope donne des résultats précis mais il est long et fastidieux (Norme NF E 48-651 et ISO 4407 / ISO 408). Il est réservé aux fluides que l'on ne peut pas compter avec un compteur automatique.

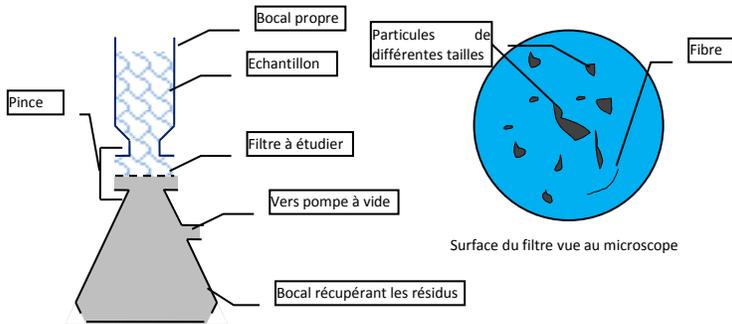


Figure 8-3 : Comptage optique

L'observation du filtre permet de compter les particules par tailles normalisées. Le nombre de particules dans chaque taille est ensuite ramené à un échantillon de 100 cm^3 . On détermine ensuite une classe de pollution pour chaque taille. L'ensemble de ces classes forme le code de pollution de l'huile. Le nombre le plus grand de ce code est la classe de pollution de l'huile (plus le nombre de la classe est élevé et plus l'huile est polluée). On vérifie alors si l'huile est conforme pour l'utilisation que l'on en fait. On peut également noter l'élévation de la pollution au cours du temps pour noter les dérives (maintenance préventive conditionnelle).

3. Comptage automatique

Ce comptage permet d'établir le nombre de particules solides par classe de grosseur de pollution.

Deux techniques de comptage de particules sont généralement utilisées: la première technique est par blocage optique la deuxième par blocage de pores.

Dans la première technique le Compteur optique de particules utilise généralement un capteur qui mesure la quantité de lumière perdu quand elle est traversée par une particule, cette quantité dépend donc de la taille de la particule. Compteurs de particules à blocage de pores fonctionnent grâce à un capteur qui mesure l'augmentation de la pression ou le débit quand l'échantillon d'huile passe à travers un capteur contenant un certain nombre de pores de taille particulière.

a) *Occultation de la lumière*

La Technologie de comptage automatique de particules à occultation de lumière a été introduite dans les années 1960. La fonction de base de l'obstruction de lumière dans APC est simple: un faisceau de lumière est projeté à travers l'échantillon du fluide, si une des particules occulte la lumière, elle se traduit par une baisse de l'énergie mesurable qui est à peu près proportionnelle à la taille de la particule.

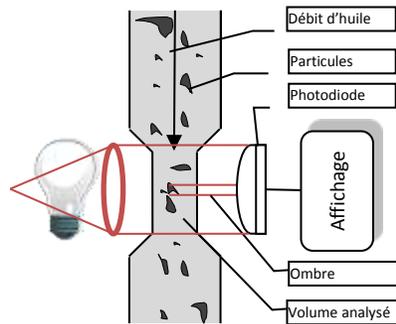
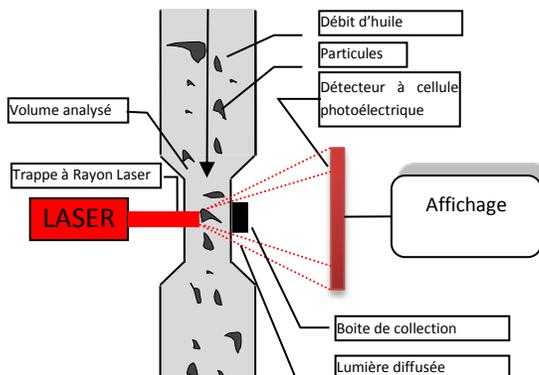


Figure 8-4 : Occultation de la lumière [4]

b) *Diffusion de la lumière*

Un type plus moderne de compteur automatique de particules (APC) est à diffusion de la lumière. Comme avec la méthode d'obstruction de la lumière, les particules produisent une interférence mesurable de la transmission de la lumière à travers l'échantillon dans la cellule de diffusion de la lumière. Cependant, au lieu de la lumière blanche simple, cette



méthode utilise un laser.

Figure 8-5 : Diffusion de lumière [4]

La lumière émise, fortement focalisée est interrompu par une particule, en produisant un effet de dispersion. L'augmentation de l'énergie à travers la zone d'échantillonnage est mesurée avec ce type de compteur de particules.

c) Blocage de tamis

Dans ce procédé, les plus grandes particules qui ne peuvent pas passer à travers le capteur sont emprisonnées tandis que les plus petites particules se retrouvent piégées dans les espaces ouverts entre les grandes particules et l'écran.

Dr Trevor James Hunt et James Fitch brevetés indépendamment, mesurent les variations de la maille ou de blocage des pores [4].

Le principe de base est le même pour les deux méthodes : les particules produisent un blocage mesurable de l'écoulement de fluide à travers un tamis à mailles calibrées.

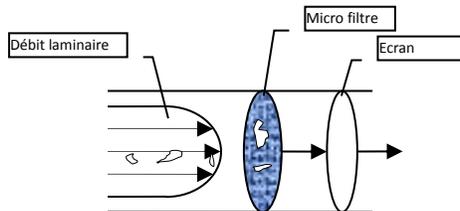


Figure 8-6 : Obstruction du débit

Dans la version Hunt, l'instrument mesure le différentiel de pression à travers l'écran, de sorte que le taux de débit doit être maintenu constant.

La méthode Fitch mesure la différence de débit à travers l'écran, ce qui nécessite que la pression appliquée est maintenue constante.

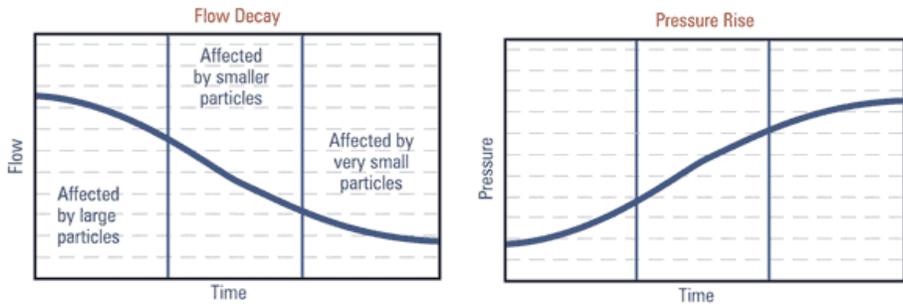


Figure 8-7 : Variation du débit, et de la pression vs temps [5]

d) *Imagerie numérique*

Une autre nouvelle technique d'analyse d'images, qui adopte une approche entièrement différente de comptage de particules. Le fluide s'écoulant à travers la zone d'essai est photographié numériquement. La surface d'une particule est mesurée sur un plan à deux dimensions, puis enregistrée pour des fins de comptage. La forme de la particule est évaluée simultanément lors de l'essai, donc en plus de la classification de la particule par la taille, l'instrument la classe en termes de mécanisme d'usure qui pourrait le produire.

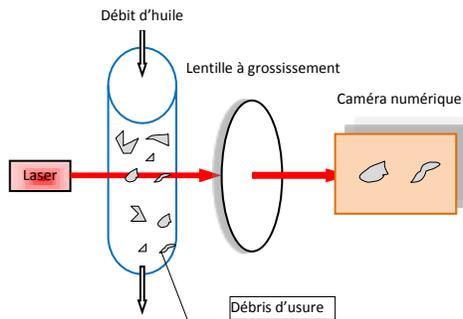


Figure 8-8 : Imagerie numérique

Par conséquent, en plus de la discrimination de l'air et de l'eau de particules solides, la technologie d'analyse d'images peut fournir des informations sur la teneur en air et en eau sur la base de la rondeur et / ou d'opacité.

Cette capacité d'analyse morphologique, permet à l'instrument d'exclure les particules parfaitement rondes, que l'on présume être de l'air ou de l'eau.

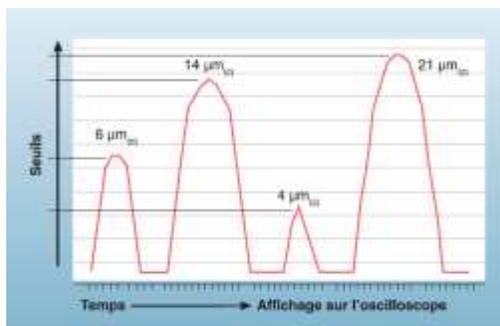


Figure 8-9 : Signal de réception [2]

A. L'analyse gravimétrique

Cette technique consiste à faire filtrer sous vide un volume connu de liquide sur deux membranes superposées et identiques. La variation de masse des deux membranes donne la teneur en impuretés solides.

Cette méthode permet de chiffrer un niveau de pollution. La membrane a une porosité de 8 microns.

La gravimétrie permet de déterminer le degré de pollution globale. Chaque membrane étant pesée avant et après la filtration, la différence donne le poids de particules arrêtées par ce filtrage et permet de calculer le poids par litre.

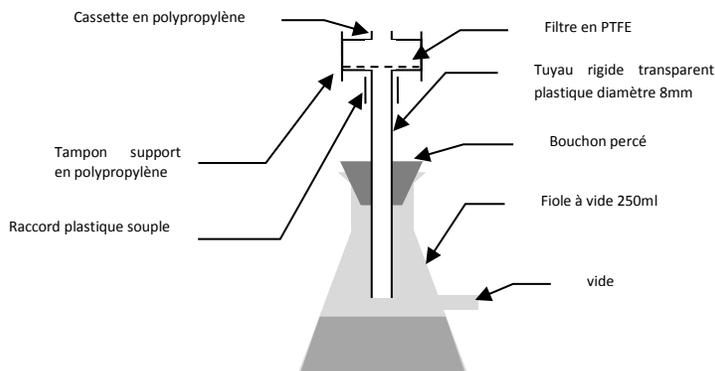


Figure 8-10 : Analyse par gravimétrie

La membrane est ensuite observée au microscope pour déterminer visuellement quel type de particules sont présentes (fibres, métaux brillants, métaux oxydés, silice, boues microniques, bronze...)

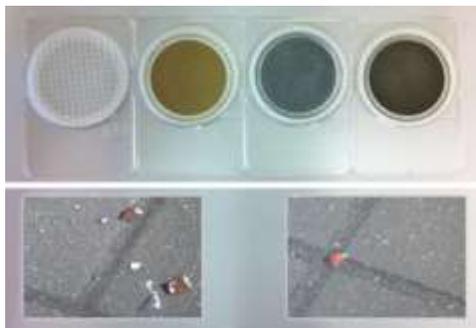


Figure 8-11 : Exemple de membrane filtrée par gravimétrie

C. La ferrographie

La forme des particules d'usure, leur aspect, l'épaisseur, le détail de bord, la texture de sa surface et les détails de rupture, fournissent une indication du type et du mode d'usure qui se produisent. Les processus d'usure produisent des particules ayant une morphologie spécifique qui peut être identifiée et classifiée, (surface fatigue, usure par frottement, rayures, écaillage, glissement et l'usure de coupe et l'usure de contact...)

La ferrographie analytique est une technique pour extraire des particules d'usure de l'huile et les déposer sur une lame de microscope en verre mince (Ferrogram) où ils peuvent être examinés sous un microscope. Un « Ferrogram » peut avoir des particules variant de 0,1 μm à jusqu'à plusieurs centaines de microns.

Elle consiste à fixer sur une lamelle de verre la contamination par les particules métalliques magnétiques d'un échantillon d'huile puis à en évaluer l'importance ou à en observer la morphologie

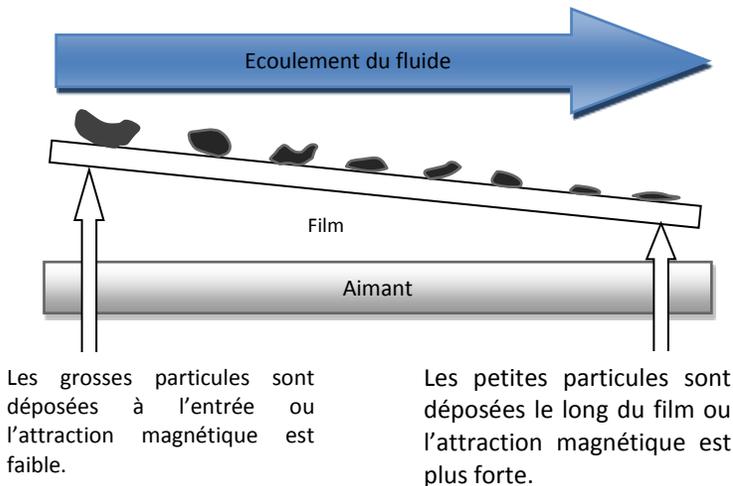


Figure 8-12 : Principe de la ferrographie

Les particules métalliques magnétiques sont fixées sur une lame en verre sous l'action d'un champ magnétique et positionnées en fonction de leurs dimensions et de leur susceptibilité magnétique. Un système optique permet de mesurer la densité optique des dépôts et d'en déduire les valeurs des critères « L » et « S » caractéristiques des grosses et petites particules présentes dans l'échantillon.

D. La spectrométrie d'émission

La spectrométrie d'émission est une technique utilisant la mesure d'absorption ou d'émission d'intensité lumineuse dans un domaine spectral allant des rayons X à l'infrarouge moyen, d'une longueur d'onde moyenne allant d'un millimicron à 25 micromètres.

L'analyse d'un échantillon d'huile selon cette méthode permet de connaître en quelques dizaines de secondes l'état de la pollution d'une huile par la détermination des teneurs en particules métalliques présentes. Elle permet également de suivre, sous certaines conditions, la concentration en additifs organométalliques du lubrifiant.

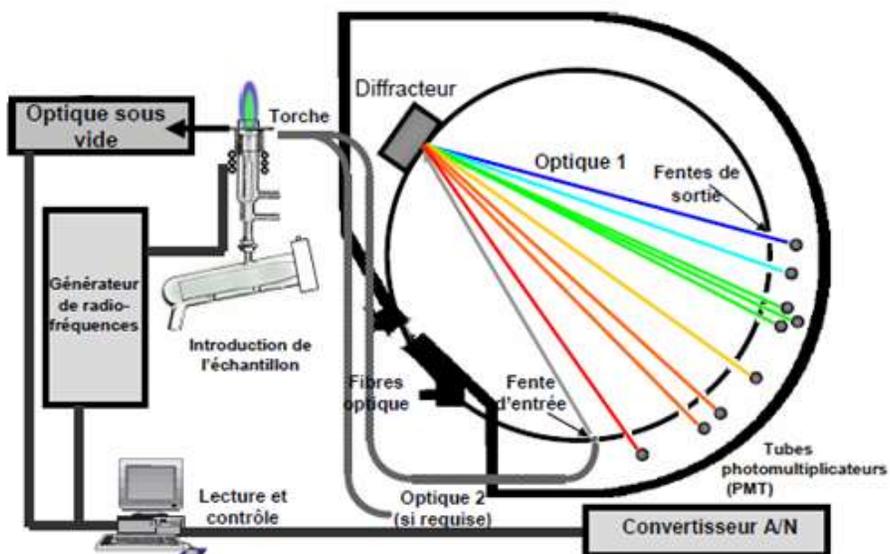


Figure 8-13 : Spectromètre à émission

La spectrométrie d'émission repose sur l'excitation, à l'aide d'énergie suffisante de l'environnement électronique des atomes, pour faire passer un ou plusieurs électrons à un niveau d'énergie supérieur. Au retour à l'état normal, ces électrons restituent leur énergie supplémentaire sous la forme d'énergie rayonnante dont l'intensité est mesurée. L'intensité de la raie spectrale correspond à un nombre d'atomes émetteurs, et nous donne la concentration en métal.

Chapitre 9. Procédés de contrôle

A. Prélèvement des échantillons

Pour permettre une analyse précise et efficace des huiles, les informations suivantes doivent être fournies avec l'échantillon d'huile, si possible sur l'étiquette.

1. Nom de l'entreprise.
2. Nom de l'équipement.
3. Type d'huile. (Boîte de vitesses, hydraulique, moteur à essence, moteur diesel, etc...)
4. Marque d'Huile et année
5. Point de prélèvement de l'Huile.
6. Heures de fonctionnement.
7. Heures de fonctionnement depuis la dernière vidange d'huile si elle est connue.
8. Tous les problèmes connus.

Pour s'assurer que l'échantillon est représentatif il faut :

1. Toujours prélever de l'huile bien mélangée après avoir fonctionné le système au moins 15 minutes.
2. Toujours prélever de l'huile à des températures normales de fonctionnement.
3. NE PAS laisser la poussière extérieure pénétrer dans l'échantillon.
4. Lors de l'échantillonnage s'assurer que l'huile est chaude.
5. Vérifiez le niveau d'huile restante et faire l'appoint si nécessaire.

Lors de l'échantillonnage de la conduite de drainage (non recommandé)

1. NE PAS prendre l'échantillon au début du drainage.

2. NE PAS prendre l'échantillon à la fin du drainage.
3. Prenez l'échantillon directement dans la bouteille après que l'huile a été drainée pour une courte période.
4. NE PAS prendre l'échantillon de l'huile collectée dans un autre récipient.
5. Vérifiez le niveau d'huile restante et faire l'appoint si nécessaire

B. Moyens de prélèvement

1. Avec la vanne d'échantillonnage

Un robinet de vidange approprié peut être connecté à un "T" dans une ligne de pression d'huile. Le côté refoulement de la vanne doit être équipé d'un bouchon de tuyau.

1. Avant de prendre un échantillon d'huile une petite quantité d'huile doit être écoulee à l'extérieur du flacon afin d'éliminer tout résidu de contamination dans les conduites d'huile.
2. S'assurer que la bouteille d'échantillonnage est d'au moins 1/3 plein. (Bouteille pleine pour les huiles hydrauliques)
3. Transférez cet échantillon au laboratoire.

2. Avec la seringue

1. Connectez longueur suffisante de tuyau à la seringue pour atteindre le centre de la boutique fluide
2. Insérer le tuyau dans le tube de la jauge à la même profondeur que la jauge de niveau ou dans le réservoir de stockage suffisante pour atteindre le centre du magasin de fluide.
3. Retirer le piston de la seringue pour obtenir un échantillon. Détachez la seringue du tube et jeter les la bouteille d'échantillonnage. Répétez ce processus jusqu'à ce que le flacon est d'au moins 1/3 plein. (Bouteille

complète pour Huiles hydrauliques) Transférez cet échantillon au laboratoire.

4. Jeter tuyau et la seringue correctement à la fin de l'échantillonnage. Ne pas réutiliser utilisation.

3. Avec pompe d'aspiration

1. Installez le flacon sur la pompe d'aspiration.
2. Insérer le tuyau de la pompe dans le tube de la jauge à la même profondeur que la jauge de niveau ou dans le réservoir de stockage à une distance suffisante pour atteindre le centre du réservoir de fluide.
3. Actionnez la pompe jusqu'à ce que la bouteille est au moins 1/3. (Bouteille pleine pour les huiles hydrauliques)
4. Transférer l'échantillon au laboratoire.
5. Ne pas réutiliser le tuyau après le premier échantillonnage. Le jeter correctement à la fin du prélèvement
6. Pour éviter de contaminer la pompe, la tenir tout droit et ne pas trop remplir les bouteilles de l'échantillon.

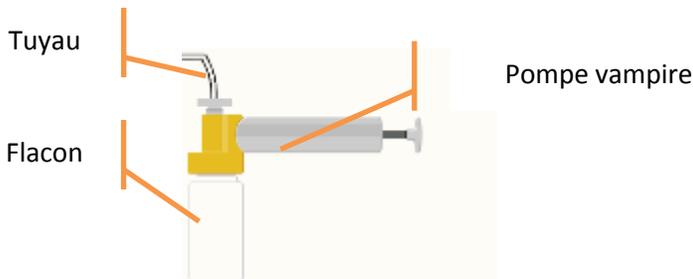


Figure 9-1 : Pompe Vampire

C. Méthodes de prélèvements

Quatre méthodes permettent de prélever des échantillons de fluides.

a) Méthode 1 : Petite vanne à boucle avec point de piquetage

1. Faire fonctionner le système pendant au moins 30 minutes avant de prélever un échantillon de fluide afin que la pollution soit homogène dans tout le système.
2. Ouvrir la prise de prélèvement et laisser couler au moins 1 litre de fluide, ne pas fermer la prise de prélèvement.
3. Au moment de l'ouverture du flacon de prélèvement, veiller à ne pas le polluer.
4. Remplir le flacon à moitié avec le fluide système, rincer les parois intérieures du flacon avant de le jeter.
5. Répéter une deuxième fois l'étape 4 en laissant constamment ouverte la prise de prélèvement.
6. Prélever suffisamment le fluide pour remplir les $\frac{3}{4}$ du flacon.
7. Boucher immédiatement le flacon puis fermer la prise de prélèvement.
8. Identifier le flacon d'échantillonnage en renseignant l'étiquette joint au flacon.

b) Méthode 2 : Vanne industrielle standard

(Norme NF E 48-650 et ISO 4021)

1. Faire fonctionner le système pendant au moins 30 minutes avant de prélever un échantillon de fluide afin que la pollution soit homogène dans tout le système.
2. Ouvrir la vanne d'échantillonnage et laisser couler au moins 3 à 4 litres de fluide (la meilleure façon d'opérer consiste à raccorder la vanne au réservoir en utilisant un flexible souple). Ne pas fermer la vanne.

3. Une fois la vanne rincée, retirer le flexible gardant la vanne ouverte et en laissant couler le fluide. Déboucher le flacon et prélever l'échantillon conformément aux instructions décrites de 4 à 6 de la méthode 1.
4. Boucher immédiatement le flacon puis fermer la vanne.
5. Identifier le flacon d'échantillonnage en renseignant l'étiquette joint au flacon.

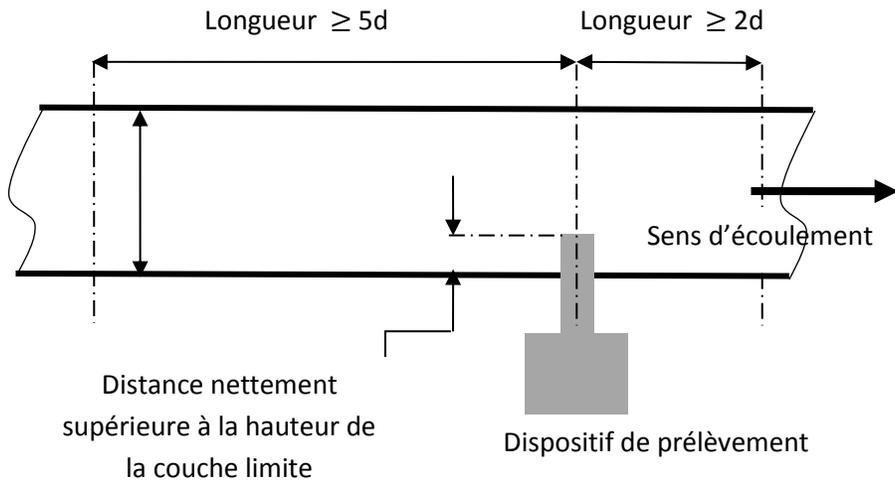


Figure 9-2 : Prélèvement dynamique en ligne

c) Méthode 3 : Réservoirs et citernes 'vrac'

1. Faire fonctionner le système pendant au moins 30 minutes avant de prélever un échantillon de fluide afin que la pollution soit homogène dans tout le système.
2. Nettoyer le pourtour de l'endroit par lequel l'échantillon de fluide sera prélevé.
3. Rincer le flexible de la pompe vampire avec du solvant filtré ($0.8 \mu\text{m}$) pour éliminer toute pollution résiduelle.

4. Raccorder un flacon de prélèvement approprié et plonger le flexible dans le réservoir jusqu'à mi-hauteur dans le fluide. Veiller à ne pas toucher les côtés du réservoir ou de la citerne avec le flexible car des particules risqueraient d'être aspirées.
5. Activer la pompe vampire jusqu'à remplir à moitié le flacon de prélèvement.
6. Dévisser légèrement le flacon pour casser le vide de la pompe et ainsi vidanger le flexible.
7. Rincer le flacon en répétant deux ou trois fois les étapes 4 à 6.
8. Collecter suffisamment de fluide pour remplir les $\frac{3}{4}$ du flacon, casser le vide et dévisser le flacon. Reboucher immédiatement et étiqueter le flacon

d) *Méthode 4 : méthode la moins conseillée*

1. Faire fonctionner le système pendant au moins 30 minutes avant de prélever un échantillon de fluide afin que la pollution soit homogène dans tout le système.
2. Nettoyer le pourtour de l'endroit par lequel l'échantillon de fluide sera prélevé.
3. Vérifier que l'extérieur du flacon de prélèvement est propre (le rincer avec du solvant filtré).
4. Déboucher le flacon de prélèvement remplir doucement le flacon en l'immergeant dans le réservoir puis jeter le fluide après avoir rincé l'intérieur du flacon.
5. Répéter l'étape 4. Remplir doucement le flacon de prélèvement, le reboucher immédiatement après et essuyer l'extérieur.

6. Refermer toutes les ouvertures du réservoir

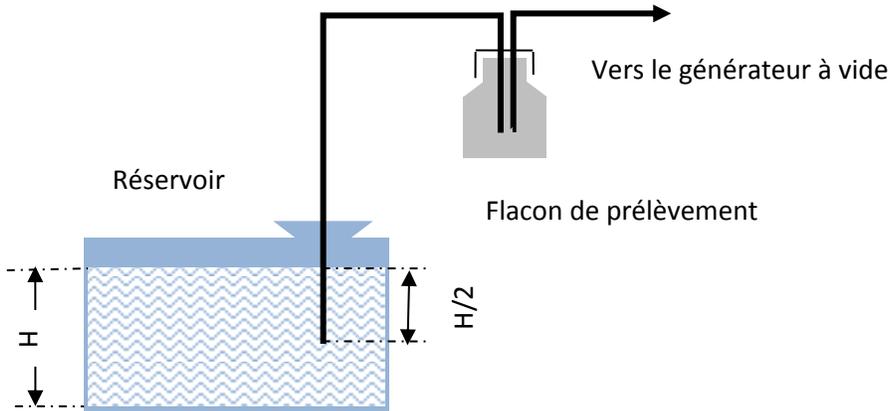


Figure 9-3 : Prélèvement statique dans le réservoir

NE JAMAIS PRÉLEVER d'échantillon à partir d'une vanne de vidange d'un réservoir. Toujours utiliser des flacons de prélèvement pré conditionnés selon la norme ISO 3722 ou équivalent.

En l'absence de prise de prélèvement déjà installée sur la tuyauterie, en installer une directement.

D. Sécurité et condition d'utilisation

1. Porter un vêtement à manches longues et des lunettes ; ces précautions peuvent vous aider à vous protéger de la température de la machine, et des projections d'huile chaude.
2. Ne polluez pas, rappez l'huile usagée à un centre de collecte des huiles.
3. Evitez tout contact prolongé entre l'huile et la peau ; lavez les mains correctement après avoir effectué le prélèvement.
4. N'utilisez le kit de prélèvement machine en marche que si les conditions de sécurité le permettent.
5. Stockez le matériel de prélèvement dans un endroit propre sec et aéré.

E. Evaluation de la pollution

1. Quantification des contaminants

Les contaminants solides des circuits hydrauliques varient en taille, en forme, en type et en quantité. Les plus nocifs ont généralement une taille comprise entre 6 et 14 microns. Les codes ISO sont les plus utilisés pour quantifier les contaminants.

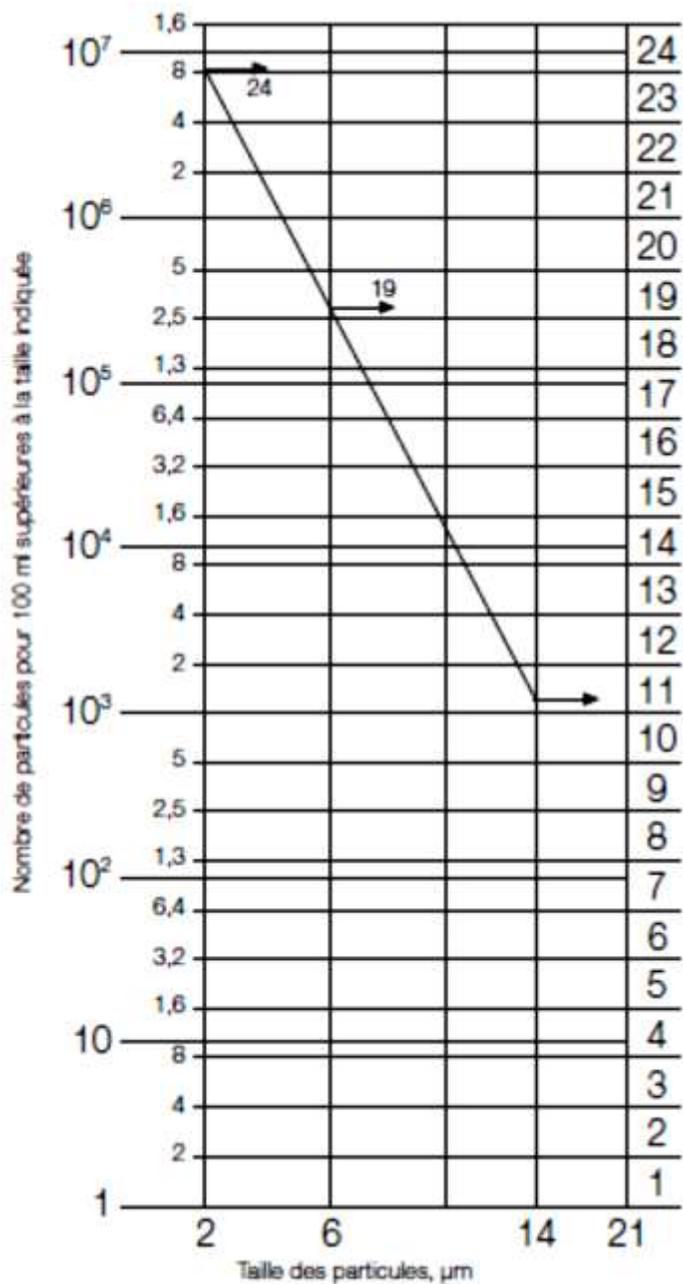
Le numéro du code ISO correspond aux niveaux de contamination des trois tailles de particules.

La première valeur de l'échelle indique le nombre de particules de taille supérieure à 4 μm (c) ; la seconde représente le nombre de particules supérieur à 6 μm (c) et la troisième représente le nombre de particules de taille supérieure à 14 μm (c) pour 100 ml de fluide.

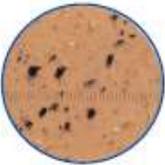
Le tableau ci-dessous donne les résultats réels de contamination relevés dans la pompe hydraulique d'un banc d'essai.

Tableau 9-1 : Résultat de contamination d'une pompe hydraulique

Taille des particules	Nombre de particules pour 100ml d'huile
4 μ	7950100
6 μ	280500
14 μ	1500
21 μ	700
38 μ	150
ISO-Code : 23/19/11	



2. Types de polluant

	<p>Silice : Particules dures et transparentes souvent associées à une pollution atmosphérique et environnementale, comme le sable ou la poussière.</p>
	<p>Métal brillant : particules métalliques brillantes, généralement de couleur argentée ou dorée, générées par le système. Ces polluants résultent des mécanismes d'usure des composants par réactions en chaîne et contribuent à accélérer la dégradation du fluide.</p>
	<p>Métal oxydé : métal ferreux présent dans la plupart des systèmes hydrauliques et de lubrification ; polluant ingéré ou généré dans le système par usure.</p>
	<p>Rouille : particules de couleur orange/marron présentes le plus souvent dans les systèmes pollués par de l'eau libre, comme par exemple les réservoirs de stockage d'huile.</p>
	<p>Fibre : polluants générés le plus souvent par du papier ou des tissus des chiffons par exemple.</p>
	<p>Dépôt de fines : une grande concentration de « boues microniques » tapisse fond de membrane d'analyse et constitue une sorte de gâteau. Ce gâteau masque les plus grosses particules.</p>

Grossissement : 100X
Echelle : 1Division =10µm

Bibliographie

- [1]. Michael Lindner, Oil Condition Monitoring Using Electrical Conductivity, OELCHECK GmbH, 2013.
- [2]. Technique de mesure de particules dans la pratique. De la théorie à l'application ; HYDAC FILTERTECHNIC GmbH; 2007
- [3]. Claude WOLFF, Dominique DUPUIS, Viscosité, Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle, R 2350.
- [4]. Noria Publication, The Low-Down on Particle Counters, Machinery Lubrication. (<http://www.machinerylubrication.com>)
- [5]. Matt Spurlock, Particle Counting or Ferrous Density ... or Both?, Machinery Lubrication. (<http://www.machinerylubrication.com>)
- [6]. <http://fr.wikipedia.org>
- [7]. <http://www.elfbras.com.br>

Partie C : Thermographie infrarouge

L'analyse thermographique est un outil de maintenance prédictive efficace à utiliser en conjonction avec d'autres types de procédés de condition monitoring. Le plus grand avantage de la thermographie est assuré quand il est utilisé pour identifier une série de problèmes possibles sur la base de l'état des divers types de machines.

Dans cette partie on traite en premier lieu les bases théoriques de la thermographie, en donnant un aperçu sur les lois qui régissent les radiations électromagnétiques. En deuxième lieu le processus et les instruments de l'imagerie thermique sont présentés en mettant l'accent sur les caractéristiques techniques, qui sont la base du choix du matériel de surveillance thermographique.

En troisième lieu, les différentes applications industrielles de la thermographie ont été présentées, ainsi que la démarche pratique pour mener une inspection selon les normes de conformité.

Chapitre 10. Base théorique de la thermographie

A. Historique

Un des premiers modèles sensés de décrire la vision des objets par nos yeux est celui du « rayon visuel » : il s'agit d'un rayon émis par nos yeux en direction de l'objet observé, et qui permet sa vision. De l'Antiquité au Moyen-âge, des savants ont défendu cette description de la vision.

IBN AL-HAYTHAM (965 – 1039) : a prouvé l'inexistence des rayons visuels. Pour lui, on ne voit les objets que s'ils réfléchissent et diffusent la lumière du Soleil qui les éclaire.

René DESCARTES (1596 – 1650) : décrit le trajet de la lumière comme une ligne (droite dans les milieux homogènes) appelée « rayon lumineux » ou « rayon de lumière ». Fait de cette description de la lumière une théorie construite appelée l'optique géométrique. Cette description de la lumière est toujours utilisée pour décrire certains phénomènes, notamment le fonctionnement des instruments d'optique usuels (loupe, microscope, lunette astronomique, etc.).

Christian HUYGENS (1629 – 1695): Observe que la lumière peut être diffractée, c'est-à-dire « éparpillée » lorsqu'elle est interceptée par un obstacle. Ce phénomène avait été observé depuis longtemps pour les ondes sonores, les ondes à la surface de l'eau, etc., et avait été appelé la diffraction. Par analogie, Huygens postule donc que la lumière peut être décrite comme une onde : une « onde lumineuse »

James Clerk MAXWELL (1831 – 1879) : Il s'agit d'une branche de la physique qui étudie les interactions électriques et magnétiques. Par le calcul, Maxwell a établi que si sa théorie était juste, il pouvait exister des « ondes électromagnétiques », c'est-à-dire la vibration simultanée d'un champ électrique et d'un champ magnétique, qui se propage dans l'espace. Pour Maxwell, les ondes électromagnétiques nécessitent un milieu pour se

propager. Maxwell postule que la lumière n'est qu'un cas particulier d'onde électromagnétique.

Heinrich Rudolf Hertz (1857, 1894) : Celui qui a apporté la preuve expérimentale des prévisions de Maxwell. En effet, il a créé des ondes électromagnétiques à l'aide d'un dispositif appelé « oscillateur de Hertz » (et qui équivaut approximativement à ce que nous appelons aujourd'hui une antenne). Les ondes électromagnétiques générées par Hertz n'étaient pas visibles. Cependant Hertz a pu mesurer leur célérité : environ 300 millions de mètres par seconde dans l'air de l'atmosphère terrestre.

EINSTEIN (1879 - 1955) : Postule que la lumière est constituée de « grains » qui transportent une énergie mais qui n'ont pas de masse. Il les appelle les photons. Cette hypothèse est à l'origine de la physique quantique, une des théories à la base de la physique contemporaine.

B. Radiation électromagnétique

Les ondes électromagnétiques couvrent un large domaine de fréquences ou de longueurs d'onde, et peuvent être classées d'après leur source principale. Cette classification n'a pas de limites très précises puisque différentes sources peuvent produire des ondes dans le domaine de fréquence qui se recouvrent.

1. Classification

a) Les ondes radio

Leurs longueurs d'onde vont de quelques kilomètres à 0.3 m. Leur domaine de fréquence s'étend de quelques Hz jusqu'à 10^9 Hz. Ces ondes sont utilisées pour la transmission des radios et dans la télévision et sont produites par des dispositifs électroniques.

b) Les micro-ondes

Les longueurs d'onde vont de 0.3 m à 10^{-3} m. Leur domaine de fréquence s'étend de 10^9 Hz à 3×10^{11} Hz. Ces ondes sont utilisées dans les

radars et autres systèmes de communication, les téléphones cellulaires, les fours à micro-onde.... Elles sont produites par des dispositifs électroniques.

c) Le spectre infrarouge

Celui-ci couvre les longueurs d'onde de 10^{-3} m à 7.8×10^{-7} m. Le domaine de fréquence s'étend de 3×10^{11} Hz à 4×10^{14} Hz. Ces ondes sont produites par les molécules et les corps chauds.

d) Le spectre visible

C'est une bande étroite formée par les longueurs d'onde auxquelles notre rétine est sensible. Il s'étend en longueur d'onde de 7.8×10^{-7} m à 3.8×10^{-7} m et en fréquence de 4×10^{14} Hz à 8×10^{14} Hz.

e) Les rayons ultra-violets

Ils vont de 3.8×10^{-7} m à environ 6×10^{-10} m en longueur d'onde et de 8×10^{14} Hz à environ 3×10^{17} Hz en fréquence. Le soleil est une source très intense de rayonnement ultra-violet. Ces rayons sont employés pour certaines applications médicales.

f) Les rayons X

Cette partie de spectre électromagnétique s'étend de 10^{-9} m à environ 6×10^{-12} m en longueur d'onde ou entre 3×10^{17} Hz et 5×10^{19} Hz en fréquence.

Cette partie de spectre électromagnétique a été découverte 1895 par le physicien allemand W. Roentgen.

g) Les rayons gamma

Ces ondes électromagnétiques sont d'origine nucléaire. Elles recouvrent la limite supérieure du spectre des rayons X. Leurs longueurs d'onde s'étendent de 10^{-10} m à en dessous de 10^{-14} m, ce qui correspond à un domaine de fréquence de 3×10^{18} Hz jusqu'à plus de 3×10^{22} Hz. Ces rayons sont produits par de nombreuses substances radioactives

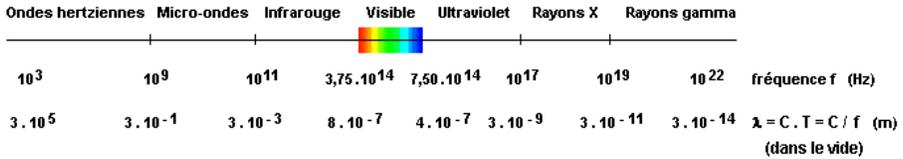


Figure 10-1 : Onde électromagnétique

2. Radiation infrarouge

a) Découverte de l'infrarouge

L'infrarouge a été découvert en 1800 par l'astronome Britannique Herschell. Tout en menant une analyse du spectre de la lumière du soleil à l'aide d'un prisme, Herschell accidentellement remarqué qu'il y avait une lumière invisible en dehors de la lumière rouge qui augmente la température d'un objet.

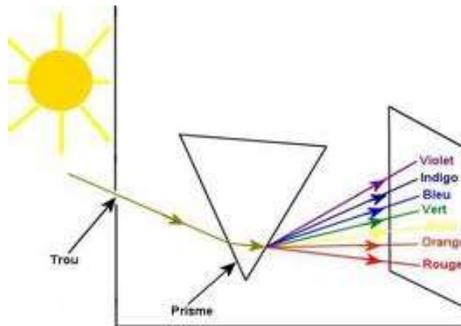


Figure 10-2 : Dispersion de la lumière par un prisme

b) Source des radiations infrarouge

Chaque corps avec une température supérieure au zéro absolu ($-273,15 \text{ } ^\circ \text{C} = 0 \text{ Kelvin}$) émet un rayonnement électromagnétique à partir de sa surface, qui est proportionnel à sa température propre. Une partie de ce rayonnement est un rayonnement infrarouge, qui peut être utilisé pour mesurer la température d'un corps quelconque.

Les corps suffisamment chauds émettent de la lumière dont la couleur dépend de la température. Si le filament d'une lampe est à 800 °C la lumière émise est essentiellement rouge. Si le filament est à 1000 °C la lumière paraît jaune. Si la température est voisine de 2500 °C la lumière est blanche car toutes les radiations visibles de longueur d'onde comprises entre 400 nm (violet) et 800 nm (rouge) sont émises.

Pour des températures encore plus élevées des rayons ultra- violets apparaissent.

c) Caractéristiques

- Les radiations infrarouges ne sont pas visibles tant que sa longueur d'onde est plus longue que la lumière visible.
- Elle est indépendante de la luminosité ou l'obscurité de la lumière visible.
- Elles sont rayonnées naturellement à partir de tout objet ayant une température absolue de 0 degrés Kelvin ou supérieure, par conséquent, elle est applicable à tous les types de domaine.
- C'est une sorte de lumière, (onde électromagnétique) elle peut traverser le vide.
- Elle a une caractéristique de chauffer un objet, cependant elle est nommée « rayonnement thermique ».
- Il existe une relation entre l'énergie infrarouge et la température d'un objet. Par conséquent la température d'un objet peut être mesurée.

d) Types

Le domaine de l'infrarouge est relativement étendu puisqu'il couvre les longueurs d'onde de 0,7 μ m à 100 μ m. Dans cette fourchette de

longueurs d'onde, on distingue généralement quatre types d'infrarouges qui vont du proche infrarouge à l'infrarouge lointain, en passant par l'infrarouge moyen et le thermique.

(1) Le proche infrarouge

Le proche infrarouge ($0,7\mu\text{m}$ à $1,6\mu\text{m}$) est la partie du spectre électromagnétique qui vient juste après le visible (couleur rouge). Comme pour le visible, ce que le radiomètre mesure dans le proche infrarouge, c'est une luminance correspondant au rayonnement solaire réfléchi par la surface terrestre.

Ce domaine du spectre électromagnétique est très utilisé en télédétection pour différencier les surfaces naturelles qui se caractérisent par de très importantes variations de la réflectance à cette longueur d'onde. Il permet également l'étude des surfaces continentales, et notamment de distinguer les surfaces végétalisées des surfaces minérales car les surfaces couvertes par la végétation se distinguent par une forte réflectance dans les longueurs d'onde du proche infrarouge, alors qu'elles réfléchissent peu le rayonnement dans le visible.

(2) L'infrarouge moyen

L'infrarouge moyen ($1,6\mu\text{m}$ à $4\mu\text{m}$) permet de façon générale d'étudier les teneurs en eau des surfaces. Il est très utilisé en foresterie et en agriculture, notamment pour cartographier les couverts végétaux en état de stress hydrique. L'atmosphère est en grande partie opaque aux rayonnements du moyen infrarouge qui sont absorbés par la vapeur d'eau. Seules quelques fenêtres atmosphériques permettent la transmission du rayonnement. Elles sont centrées sur les longueurs d'onde $2,5\mu\text{m}$, $3,5\mu\text{m}$ et $5\mu\text{m}$.

(3) L'infrarouge thermique

Dans ce domaine spectral ($4\mu\text{m}$ à $15\mu\text{m}$), le rayonnement dépend des propriétés d'émissivité des surfaces et les capteurs satellitaires mesurent la température apparente des objets. En effet une partie du

rayonnement visible et proche infrarouge parvenant à la surface de la terre est absorbée par les objets, puis réémise sous forme de chaleur à une plus grande longueur d'onde.

(4) L'infrarouge lointain

L'infrarouge lointain (15 μm à 100 μm) n'est utilisé ni pour l'observation de la terre, ni pour l'étude de l'atmosphère, mais pour étudier la formation des galaxies et des étoiles. Les détecteurs, appelés bolomètres utilisent cette gamme de longueurs d'onde pour mesurer l'intensité du rayonnement infrarouge émis par les corps célestes.

Tableau 10-1 : Types d'infrarouges

Désignation	Abréviation	Longueur d'onde
Infrarouge proche	PIR	0,7 μm – 1.6 μm
Infrarouge moyen	MIR	1.6 μm – 4 μm
Infrarouge Thermique	TIR	4 μm -15 μm
Infrarouge lointain	LIR	15 μm – 100 μm

C. Loi de radiation

1. Corps noir

Un corps noir est un corps hypothétique qui émet un rayonnement à l'intensité maximale possible pour chaque longueur d'onde. Et absorbe complètement toutes les radiations de l'incident (d'où le terme «noir»).

2. Loi de Planck

La loi de Planck décrit la répartition de l'énergie électromagnétique rayonnée par un corps noir à une température donnée, en fonction de la longueur d'onde.

$$E^*(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\left(\frac{C_2}{\lambda T} \right)} - 1 \right)} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ W.m}^2 \\ C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ K.m} \end{cases}$$

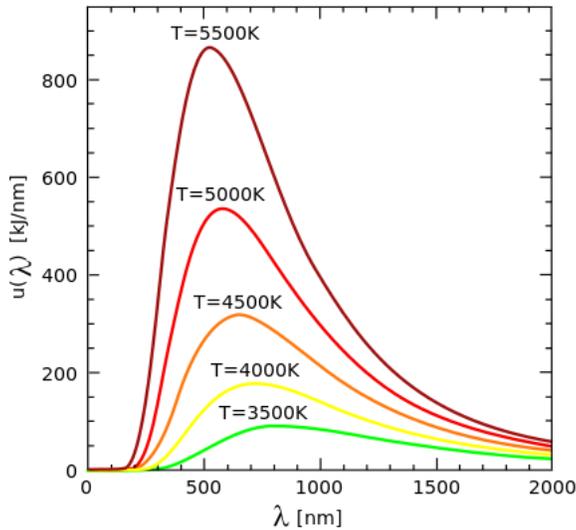


Figure 10-3 : Courbes de Planck

Autrement la loi de Planck peut s'écrire :

$$E^*(\lambda) = \frac{2\pi h C^2}{\lambda^5 \left(e^{\left(\frac{hC}{\lambda kT} \right)} - 1 \right)} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} C = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1} \\ h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} \\ k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.s}^{-1} \end{cases}$$

λ : est la longueur d'onde en mètre.

T : est la température absolue en Kelvin.

h : est la constante de Planck.

k : est la constante de Boltzmann en joule par seconde

C : est la vitesse de la lumière en mètre par seconde

La loi de Planck représente la dépendance spectrale de l'énergie émise par un corps noir à différentes températures absolues.

À différentes températures radiatives, l'aire sous la courbe de Planck change et la qualité spectrale du rayonnement se déplace le long de l'axe de longueur d'onde.

Ces deux effets sont décrits par deux lois bien connues: l'une basée sur l'intégration de l'équation de Planck qui permet de déterminer l'énergie de rayonnement totale émise (Loi de Stefan-Boltzmann), et l'autre sur la base de la différenciation de l'équation pour obtenir la longueur d'onde pic du spectre (Loi de déplacement de Wien).

3. Loi de Stefan-Boltzmann

La loi de Stefan se déduit de la loi de Planck, qui permet de déterminer la luminance énergétique totale

$$E^* = \int_0^{+\infty} E^*(\lambda) d\lambda$$

La valeur totale de l'énergie rayonnante émise par un corps noir est proportionnelle à la puissance quatrième de la température absolue de ce corps.

$$E^* = \sigma T^4$$

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$: Constante de Stefan-Boltzmann

4. Loi de déplacement de Wien

En physique, la loi du déplacement de Wien, ainsi nommée d'après son découvreur Wilhelm Wien, est une loi selon laquelle la longueur d'onde

à laquelle un corps noir émet le plus de flux lumineux énergétique est inversement proportionnelle à sa température. La loi de Wien se déduit de la loi de Planck du rayonnement du corps noir.

La loi de Planck décrit la distribution de l'énergie $E^*(\lambda)$ rayonnée en fonction de la température T du corps noir. Selon la loi de Planck, à une température T donnée, l'énergie $E^*(\lambda)$ passe par un maximum E^*_{\max} pour une longueur d'onde λ_{\max} .

La loi de Wien décrit la relation liant la longueur d'onde λ_{\max} , correspondant au pic d'émission lumineuse du corps noir, et la température T (exprimée en kelvin). On retient généralement, en exprimant la longueur d'onde en mètre et la température en kelvin La longueur d'onde du pic de la courbe spectrale:

$$\lambda_{\max} = \frac{2897}{T} (\mu m)$$

5. Emissivité

Les objets réels émettent des rayonnements à un taux inférieur à celui d'un corps noir (un émetteur parfait). L'efficacité de l'émission par un objet à une température donnée est dépendante de la longueur d'onde. L'Émissivité est définie comme :

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{E(\lambda)}{E^*(\lambda)}$$

Mais il est souvent commode d'exprimer l'émissivité sous sa forme intégrale, comme suit:

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{+\infty} E(\lambda) d\lambda}{\sigma T^4} = \frac{E}{\sigma T^4}$$

D. Transfert de chaleur

Il existe trois modes de transfert de chaleur: conduction, convection, et rayonnement. Tout processus de transfert de chaleur se produit par une ou plusieurs de ces trois modes. La thermographie infrarouge est basée sur la mesure de flux de chaleur radiative, et est donc plus étroitement liée au mode de transfert de chaleur par rayonnement.

1. Conduction

La conduction est le transfert de chaleur dans les milieux fixes. Il est le seul mode de transfert de chaleur dans les solides, mais peut également avoir lieu dans les liquides et les gaz. Il se produit comme le résultat de collisions moléculaires (dans les liquides) et les vibrations atomiques (dans les solides) par laquelle l'énergie est déplacée, une molécule à la fois, à partir de sites de températures plus élevées aux sites de plus basse température.

La loi de conduction de Fourier exprime le flux de chaleur par conduction à travers une paroi.

$$Q = A \times k \frac{T_1 - T_2}{L}$$

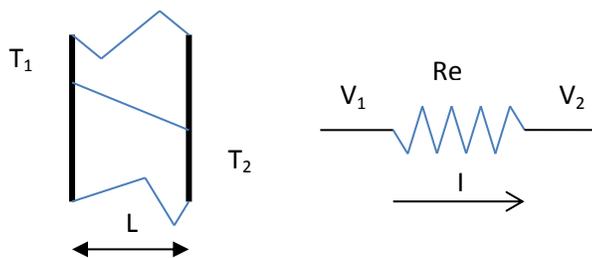


Figure 10-4 : Transfert de chaleur par conduction

La conductivité thermique est analogue à la conductivité électrique et inversement proportionnel à la résistance thermique.

Les températures T_1 et T_2 sont analogues à des tensions V_1 et V_2 , et le débit chaleur $\frac{Q}{A}$ est analogue au courant électrique I , de sorte que :

$$R_e = \frac{V_1 - V_2}{I} \quad \text{et} \quad R_t = \frac{T_1 - T_2}{\frac{Q}{A}} = \frac{L}{k}$$

2. Convection

Transfert de chaleur par convection a lieu dans un milieu en mouvement et est presque toujours associée avec un transfert entre un solide et d'un fluide en mouvement (comme l'air).

$$Q = A \times h \times (T_s - T_a)$$

La loi de refroidissement de Newton définit le coefficient de convection de transfert de chaleur :

$$h = \frac{\frac{Q}{A}}{T_s - T_a}$$

La convection forcée a lieu quand une force d'entraînement externe, telle qu'une éolienne ou une pompe à air, déplace le fluide. Convection libre a lieu lorsque les différences de température nécessaire pour transfert de chaleur produisent des changements de densité dans le liquide et le fluide chaud augmente par suite de l'augmentation de la flottabilité.

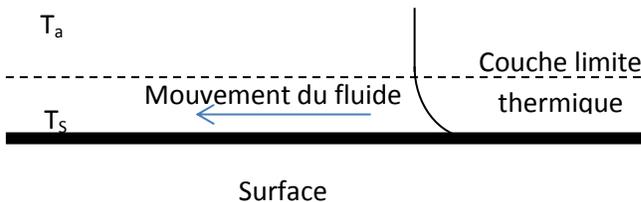


Figure 10-5 : Transfert thermique par convection

3. Rayonnement

Transfert de chaleur par rayonnement est la différence des deux autres modes à plusieurs égards:

- Elle peut avoir lieu dans un vide.
- Il se produit par les émissions électromagnétiques et l'absorption.
- Il se produit à la vitesse de la lumière.
- L'énergie transférée est proportionnelle à la puissance quatrième de la différence de température entre les objets.

a) *Echange de radiation*

La mesure du rayonnement infrarouge thermique est la base de la thermographie et de la mesure de la température sans contact. Le rayonnement thermique IR traversant une surface (W) est appelé radiosité. Elle peut être émise à partir de la surface, réfléchie par la surface, ou transmise à travers la surface. Ceci est illustré dans la Figure 10-6. La totale radiosité est égale à la somme de la composante émise (W_e), la composante réfléchie (W_r) et le composant d'émission (W_t). La température de la surface est liée à (W_e), la composante émise, seulement.

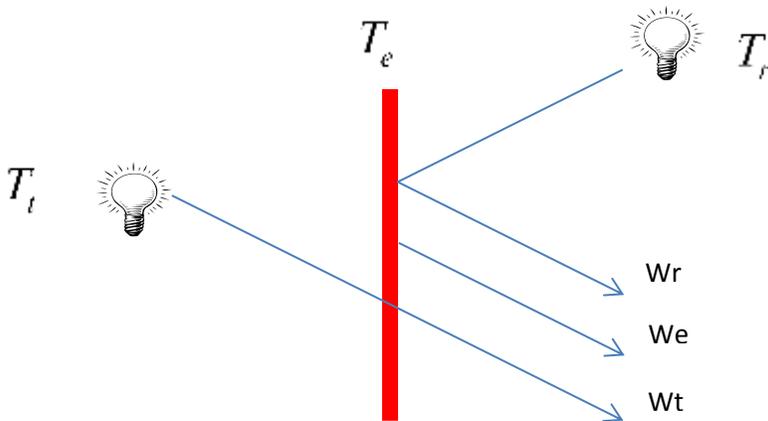


Figure 10-6 : Flux de chaleur radiatif

$$W_e + W_r + W_t = W$$

$$W_e = \varepsilon \sigma T_e^4$$

b) Loi de Kirchhoff

Le rayonnement thermique IR incident sur une surface peut être absorbée, réfléchi ou transmise comme illustré sur la Figure 10-7. La loi de Kirchhoff indique que la somme des trois composants est toujours égale à la radiation reçue (le pourcentage de la somme de trois composants équivaut à l'unité):

$$W_t = W_\rho + W_\alpha + W_\tau$$

Avec :

$$W_\rho = \rho W_t : \text{Energie Réfléchiée}$$

$$W_\alpha = \alpha W_t : \text{Energie Absorbée}$$

$$W_\tau = \tau W_t : \text{Energie Transmise}$$

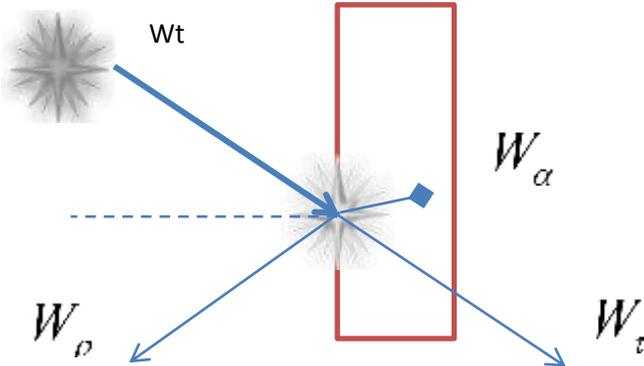


Figure 10-7 : Rayonnement incident sur une surface

Les propriétés caractéristiques d'un matériau sont définies par les coefficients de Réflectivité (ρ), Transmissivité (τ) et Absorptivité (α); telle que :

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

La rugosité et les caractéristiques de la surface vont déterminer le type et l'orientation de la réflexion du rayonnement incident. Une surface lisse reflète l'énergie incidente à un angle complémentaire de l'angle d'incidence. C'est ce qu'on appelle un réflecteur spéculaire.

Une surface rugueuse fait disperser une partie du rayonnement incident. C'est ce qu'on appelle un réflecteur. Dans la nature on ne trouve pas une surface parfaitement spéculaire ou parfaitement diffuse. Toutes les surfaces réelles ont une certaine diffusivité et spécularité.

Lors de mesures pratiques, les caractéristiques spéculaires ou de diffusion d'une surface sont prises en compte dans l'émissivité de la surface.

Si toute l'énergie de tomber sur un objet ont été absorbés (pas de transmission ou de réflexion), le coefficient d'absorption serait égale à 1. À une température constante, toute l'énergie absorbée peut être re-rayonnée (émise) de sorte que l'émissivité d'un tel organe serait égal à 1. Par conséquent, dans un corps noir : $\alpha = \varepsilon = 1$

Chapitre 11. Imagerie thermique

A. Introduction

La température est un des paramètres importants pour décrire l'état du processus interne, le matériel et même sa qualité désirée. Une conclusion qualitative mais précise peut être tirée par l'observation du profil de température de n'importe quelle surface. D'un autre côté une température plus élevée indique également la perte évidente de l'énergie sous forme de chaleur. C'est pourquoi la surveillance de la température donnerait amplement une indication de l'état du matériel, la qualité des processus et d'explorer la possibilité de voies de conservation de l'énergie.

1. Processus

Thermographie Infrarouge est la science de l'acquisition et l'analyse de l'information thermique en utilisant des dispositifs d'imagerie thermique sans contact.

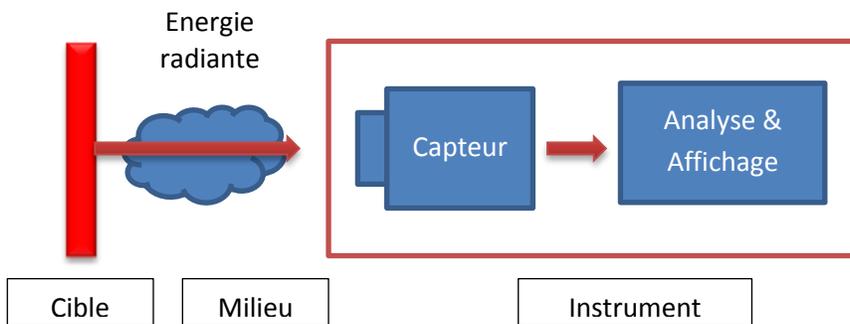


Figure 11-1 : Processus d'analyse thermographique

L'analyse thermographique est une technique dans laquelle une caméra infrarouge ou un dispositif, est utilisé pour représenter

photographiquement la surface thermique d'un composant ou d'une machine, sur la base de la radiation émise par l'objet.

2. Avantages et inconvénients

Du point de vue avantage, il est important à noter que la thermographie peut être mise en œuvre dans de nombreux domaines de l'industrie. Ces gammes d'utilisation industrielle dans la surveillance, maintenance prévisionnelle et à l'aide des données, permet de planifier une stratégie de maintenance plus efficace. L'utilisation de la thermographie peut être un facteur clé dans la réussite d'un programme d'entretien.

Les inconvénients doivent également être considérés. Beaucoup d'inconvénients qui utilisent d'être répandue ont été adressé par la mise en œuvre d'une meilleure logiciel et progiciel de matériel. L'inconvénient majeur qui doit encore être abordée est celle de l'exploitation de l'appareil photo dans un environnement industriel. Le fonctionnement de l'appareil photo peut être un peu lourd et prend un certain temps de développement jusqu'à ce que l'utilisateur soit à l'aise.

B. Instrument de thermographie

Un instrument de thermographie peut être un pointeur thermique ou un scanner thermique. Le pointeur thermique mesure la température d'un point de dimension spécifique quand à un scanner, mappe le profil thermique d'une superficie.

1. Caméra thermique

Une caméra thermique enregistre les différents rayonnements infrarouges (ondes de chaleur) émis par les corps et qui varient en fonction de leur température. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, une caméra thermique ne permet pas de voir derrière une paroi ou un obstacle.

Elle reproduit la chaleur emmagasinée par un corps, ou montre le flux thermique d'une paroi en raison d'un foyer se trouvant à l'arrière. Les vitres ainsi que les parties métalliques polies reflètent l'image thermique tel un miroir. Cette image, bien que moins nette, peut cependant induire un observateur en erreur.



Figure 11-2 : Caméras thermographique (FLIR)

Bien que la longueur d'onde du rayonnement infrarouge dépende de la température, les caméras thermiques ont en général un seul canal (comme une caméra qui filme en "noir et blanc"), et les caméras se contentent de produire une image de l'intensité du rayonnement, qui permet également d'apprécier la température de la source. La couleur produite par la caméra est une fausse couleur, obtenue en associant une couleur à l'intensité reçue, afin de faciliter la lecture directe de la température : à chaque couleur de l'image correspond une température.



Radiation IR

Caméra thermique = Convertisseur

Lumière visible

Figure 11-3 : Conversion du rayonnement infrarouge en lumière visible

a) Principe de fonctionnement

Une caméra d'imagerie thermique infrarouge utilise une lentille spéciale qui se concentre principalement de la lumière infrarouge émise par

l'ensemble des objets qu'il peut voir. La lumière infrarouge émise est traitée par un réseau de détecteurs à infrarouge, qui crée alors un profil de température qui est également connu en tant que "thermogramme". L'ensemble du processus de l'obtention de la lumière infrarouge pour faire un thermogramme prend environ 0,033 millisecondes. Après le thermogramme est créé, il est ensuite transformé en une impulsion électrique.

L'impulsion électrique qui a été fabriqué à partir du thermogramme est ensuite envoyé à une unité de traitement unique ou d'une carte de circuit qui est principalement axé sur la transmission du signal de données en une pour l'affichage. Une fois les données ont été envoyées à l'écran, les gens puissent voir des couleurs différentes en fonction de l'intensité de l'émission de la lumière infrarouge. A travers les différentes combinaisons qui venaient des impulsions apportées par différents objets, une image thermique infrarouge est alors créée [11].

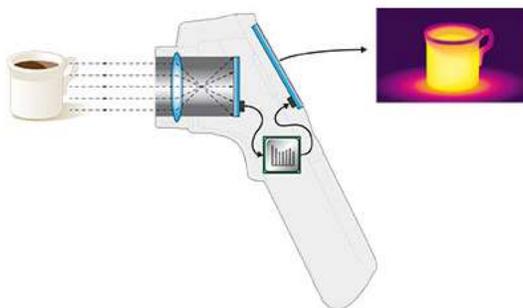


Figure 11-4 : Principe de fonctionnement d'une caméra infrarouge

b) Types

Il existe principalement deux types de caméras thermiques :

- les caméras avec un capteur infrarouge non refroidi. Le capteur fonctionne par la mesure de la variation d'une grandeur (courant, tension) en fonction de la température en chaque point du capteur. Cette température varie en fonction de la quantité de rayonnement infrarouge

reçue. Comme ce type de caméra n'a pas besoin d'enceinte cryogénique, il est meilleur marché que l'autre type, mais souffre de performances inférieures.

- les caméras avec un capteur infrarouge refroidi. Ce type de caméra utilise un conteneur refroidi par des techniques de cryogénie, le capteur étant enfermé dans une enceinte sous vide ou dans un vase de Dewar. Le capteur utilisé est un capteur photographique mais grâce à l'utilisation de matériaux différents de ceux des appareils photographiques, il permet l'acquisition dans le domaine de l'infrarouge. Sans système de refroidissement, le capteur serait ébloui à cause de sa propre émission infrarouge.

c) Caractéristiques

(1) Résolution (IR & Spatial)

Les caméras thermiques ou caméras infrarouges sont définies par leur résolution spatiale (le plus petit objet visible) et leur résolution thermique (la plus petite différence de température perceptible). Ces deux résolutions ne sont pas indépendantes et les caméras sont en général caractérisées par la courbe donnant l'évolution de la résolution thermique en fonction de la résolution spatiale. Cette courbe s'appelle courbe de MRTD (Minimum Resolvable Temperature Difference) exprimée en cycles/mrad.

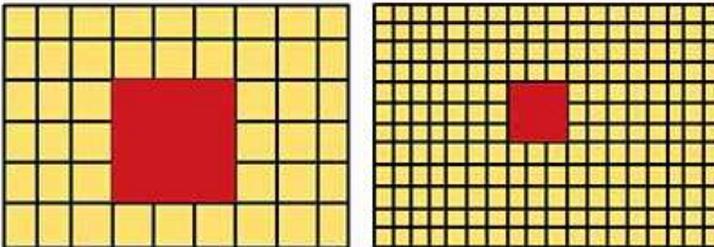


Figure 11-5 : Résolution spatiale

La Minimum Resolvable Temperature Difference (MRTD), se traduit en français par « Différence de Température Minimale Résolvable » (ou Perceptible, selon les auteurs) ; c'est une mesure physique utilisée pour caractériser les caméras infrarouges. C'est la plus petite différence de température que l'on peut distinguer à l'œil sur un écran de visualisation de la caméra quand celle-ci est placée en face d'une mire thermique.

Les modèles les plus abordables ont une résolution de 60 x 60 pixels, tandis que les modèles haut de gamme ou de pointe ont une résolution de 640x480 pixels. Les caméras thermiques avec une résolution de 320x240 ou 640x480 pixels offrent une qualité d'image supérieure. Pour les inspections les plus avancées la résolution de 640x480 pixels est de plus en plus la norme pour les thermographistes professionnels. Un appareil photo de 640x480 pixels a 307200 points de mesure en une image qui est quatre fois plus qu'un appareil photo avec 320x240 pixels et 76800 points de mesure. Non seulement la précision de la mesure serait mieux, mais il y a aussi une énorme différence dans la qualité de l'image. Haute résolution permet de voir, de mesurer et de comprendre plus avec précision.



Figure 11-6 : Image thermique: 640 x 480 pixels, 320 x 240 pixels.

Distance	160 x 120 (E40, 25° lens)	640 x 480 (T640, 25° lens)
1 m	8.3 mm x 8.3 mm	2.0 mm x 2.0 mm
15 m	125 mm x 125 mm	30.6 mm x 30.6 mm

(2) Sensibilité

La sensibilité thermique décrit comment la plus petite différence de température de l'appareil photo peut être détectée.

Avec la meilleure sensibilité thermique, la différence minimale de température que la caméra d'imagerie thermique peut détecter et visualiser. Habituellement, la sensibilité thermique est décrite en ° C ou mK.

La plupart des caméras d'imagerie thermique de pointe pour les applications industrielles ont une sensibilité thermique de 0,03 ° C (30 mK).

Le fait de pouvoir détecter ces différences de température est important dans la plupart des applications d'imagerie thermique. La haute sensibilité d'une caméra est particulièrement importante pour des applications industrielles où les différences de température sont faibles.

Ces petites différences de température peuvent être des informations cruciales à la fois pour diagnostiquer le problème et planifier de nouvelles actions.

(3) Précision

Toutes les mesures sont sensibles à l'erreur, et malheureusement, les mesures de température de l'imagerie thermiques ne font pas exception. C'est là que la précision de l'imagerie thermique entre en jeu.

C'est là que la précision de l'imagerie thermique entre en scène.

Dans un rapport d'information d'imagerie thermique l'exactitude est exprimée à la fois en pourcentage et en degrés Celsius. Il s'agit de la marge d'erreur dans lequel l'appareil fonctionne. La température mesurée peut varier de la température effective avec soit le pourcentage mentionné ou la

température absolue, selon le plus grand. La norme actuelle de précision dans l'industrie est de $\pm 2\% / \pm 2^\circ \text{C}$.

(4) Champs de vision (FOV)

Chaque appareil photo définit son champ de vision sur un des axes horizontaux / verticaux. Le champ de vision instantanée (CVI) (IFOV) est la plus petite cible, que la caméra peut "voir". Bien une caméra infrarouge peut ramasser de nombreux points chauds, de nombreux taches seront trop faible pour être mesurée avec précision avec une caméra IR radiométrique (qui affiche une température sur l'image).

$$IFOV = \frac{HFOV(^{\circ})}{ndH} = \frac{VFOV(^{\circ})}{ndV}$$

HFOV (Horizontal Field Of View) : angle horizontal sous lequel la camera voit la scène thermique.

VFOV (Vertical Field Of View) : angle vertical sous lequel la camera voit la scène thermique.

ndH : nombre de détecteur sur une ligne.

ndV : nombre de détecteur sur une colonne.

Dans la pratique IFOV est exprimé en mrad (milliradians)

$$IFOV = \frac{HFOV(^{\circ}) \times \pi \times 1000}{ndH \times 180^{\circ}} = \frac{VFOV(^{\circ}) \times \pi \times 1000}{ndV \times 180^{\circ}}$$

Le diamètre apparent (exprimée en degrés ou en radians angulaires de chaque côté si degrés ou en radians rectangulaires, et angulaires si circulaire) sur laquelle un instrument intégreront toute l'énergie rayonnante entrant. Dans un thermomètre à rayonnement ce qui définit la taille du point cible; dans un scanner ou imageur ce qui définit l'angle de balayage ou de la taille de l'image ou du champ de vision total (TFOV).

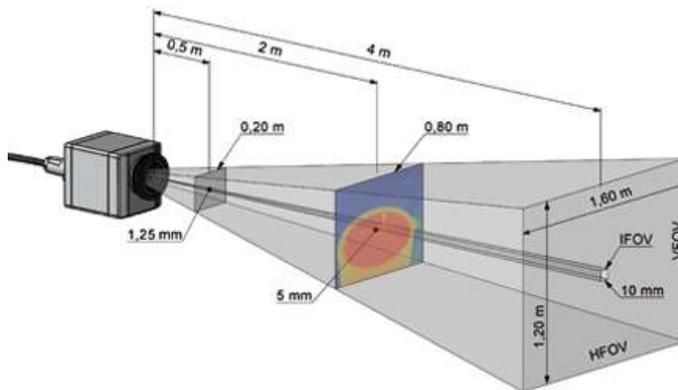
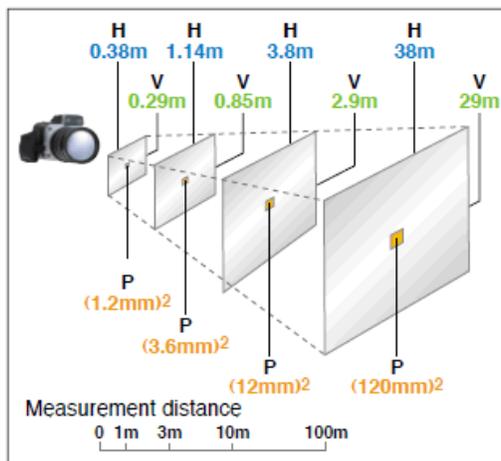


Figure 11-7 : FOV Horizontal et Vertical

En règle générale, les caméras IR ont un champ de vision d'environ 24 ° (horizontal) et 20 ° (vertical). Ainsi, il est conseillé de faire des calculs basés sur un objectif standard.



□ H-V: Field of View ■ P: Minimum Detectable Area
(Figures: at f20mm)

Figure 11-8 : Surface minimale détectable

(5) Gamme de température

Les caméras thermiques sont étalonnées pour une ou plusieurs plages de température. Mesure correcte de la température n'est pas possible en dehors des plages spécifiées.

La gamme et la sensibilité de la température d'une caméra IR sont des considérations importantes. La gamme de température vous indique les températures minimales et maximales que la caméra peut mesurer (-4 ° F à 2192 ° F est un exemple typique).

La saturation se produit lorsque l'on mesure une température supérieure à la plage de température étalonnée.



Figure 11-9 : Phénomène de saturation

Sensibilité vous indique la plus petite différence de température entre deux objets que la caméra peut discerner (0,05 ° C, par exemple). Vous devez sélectionner un Caméra IR avec une plage de température assez large pour englober toutes les températures dans les objets ou les scènes que vous rencontrez habituellement.

2. Pointeur thermique

Chaque corps avec une température supérieure au zéro absolu (-273,15 ° C = 0 Kelvin) émet un rayonnement électromagnétique à partir de sa surface, qui est proportionnel à sa température propre. Une partie de ce soi-disant intrinsèque rayonnement est un rayonnement infrarouge, qui peut être utilisé pour mesurer la température d'un corps.

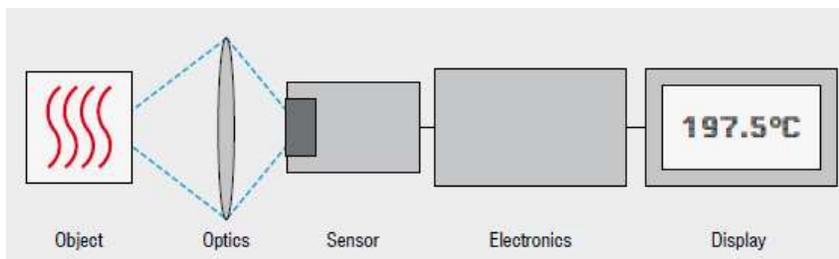


Figure 11-10 : Principe de mesure de température

Ce rayonnement pénètre dans l'atmosphère. Avec l'aide d'une lentille (optique d'entrée) les faisceaux sont focalisés sur un élément détecteur, qui génère un signal électrique proportionnel au rayonnement. Le signal est amplifié, en utilisant un traitement des signaux numériques successifs, et transformé en un signal de sortie proportionnel à la température de l'objet. La mesure de la valeur peut être affichée sur un écran ou libéré en tant que signal de sortie analogique, qui prend en charge une connexion facile aux systèmes de contrôle et de gestion de processus.

L'illustration suivante montre la structure générale d'un thermomètre infrarouge. Avec l'aide de l'optique d'entrée le rayonnement émis par l'objet est axée sur un détecteur infrarouge. Le détecteur génère un signal électrique correspondant qui est ensuite amplifié et peut être utilisé pour un traitement ultérieur.

Le traitement de signal numérique transforme le signal en une valeur de sortie proportionnelle à la température de l'objet.

Le résultat de température est soit représenté sur un dispositif d'affichage ou peut être utilisé en tant que signal analogique pour un traitement ultérieur.

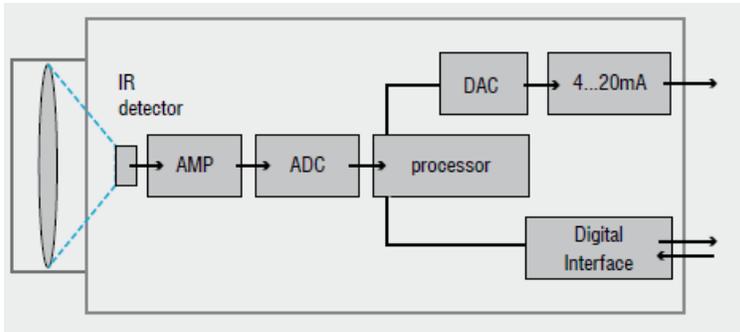


Figure 11-11 : Structure générale d'un thermomètre infrarouge

Afin de compenser les influences de l'environnement un second détecteur capte la température de l'appareil de mesure et de son optique canalisé, respectivement.



Figure 11-12 : Thermomètre infrarouge portable [2]

Chapitre 12. Applications industrielles

A. Introduction

Les caméras thermiques pour les applications industrielles sont puissants et des outils non invasifs pour la surveillance et le diagnostic de l'état d'installations et de composants électriques et mécaniques. Avec un caméra d'imagerie thermique, vous pouvez identifier les problèmes au début, ce qui permet qu'ils soient documentées et corrigées avant de devenir plus graves et plus coûteux à réparer.

B. Systèmes électriques

Les caméras thermiques sont couramment utilisées pour les inspections de systèmes et composants électriques dans toutes les tailles et formes.

La multitude d'applications possibles pour les caméras thermiques dans les systèmes électriques peut être divisé en deux catégories: installations à haute tension et basse tension.

1. Installation à haute tension

La chaleur est un facteur important dans les installations à haute tension. Lorsque le courant électrique passe à travers un élément résistif, il génère de la chaleur. Un des résultats de la résistance accrue est une augmentation de la chaleur.

Au fil du temps la résistance des connexions électriques va augmenter, en raison d'un relâchement et à la corrosion par exemple. L'augmentation correspondante de la température peut provoquer des pannes des composants, ce qui entraîne des coupures non planifiée et même des accidents. En outre, l'énergie consacrée à la génération de la chaleur provoque des pertes d'énergie inutiles. Si rien n'est fait, la chaleur peut même atteindre le point où les connexions se fondent et se

décomposent; comme en conséquence, les incendies peuvent déclencher. Des exemples de défaillances dans les installations à haute tension qui peuvent être détectés avec l'imagerie thermique:

- Oxydation de commutateurs haute tension
- Connexions surchauffées
- Des connexions sécurisées incorrecte
- Défaut d'isolant

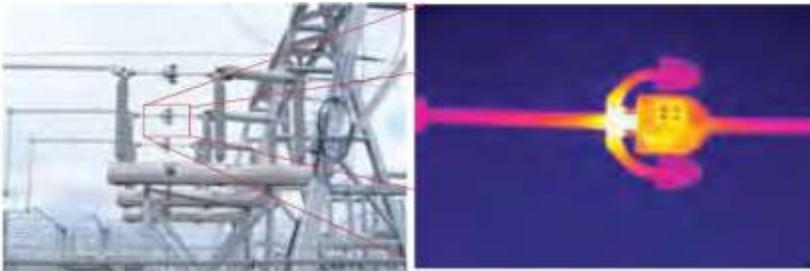


Figure 12-1 : Défaut détecté dans une installation haute tension [10]

2. Installation à basse tension

Les armoires électriques et les centres de contrôle des moteurs sont régulièrement analysés avec une caméra d'imagerie thermique. Si rien n'est fait, la chaleur peut s'élever à un point des connexions qui fondent et se décomposent; en conséquence, les feux peuvent éclater.

Outre les connexions desserrées, les systèmes électriques souffrent de déséquilibres de charge, corrosion, et l'augmentation de l'impédance de courant. L'inspection thermique peut localiser rapidement les points chauds, déterminer la gravité du problème, et aider établir le délai dans lequel l'équipement doit être réparé.

Des exemples de défaillances dans les équipements à basse tension qui peut être détecté avec l'imagerie thermique:

- Connexions à haute résistance
- Connexions corrodées

- Dommages de fusible interne
- Défauts internes de disjoncteur
- Mauvaises connexions et des dommages internes

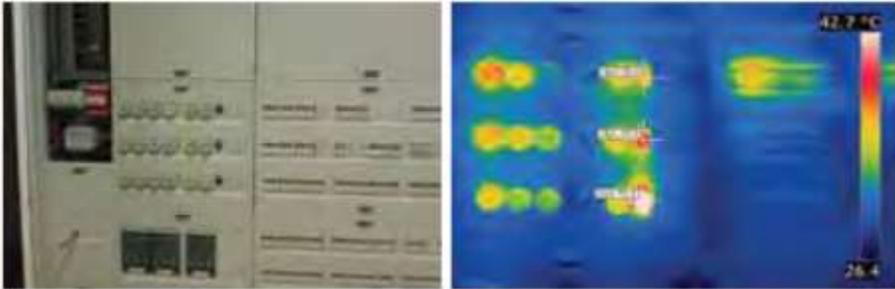


Figure 12-2 : Charge non répartie dans les boîtes à fusibles

C. Installations mécaniques

Dans de nombreux secteurs, les systèmes mécaniques servent de colonne vertébrale des opérations.

Les données thermiques recueillies avec une caméra d'imagerie thermique peuvent être une source inestimable d'informations complémentaires aux études de surveillance vibratoire de l'équipement mécanique.

Les systèmes mécaniques se chauffent s'il y a un désalignement à un certain point dans le système.

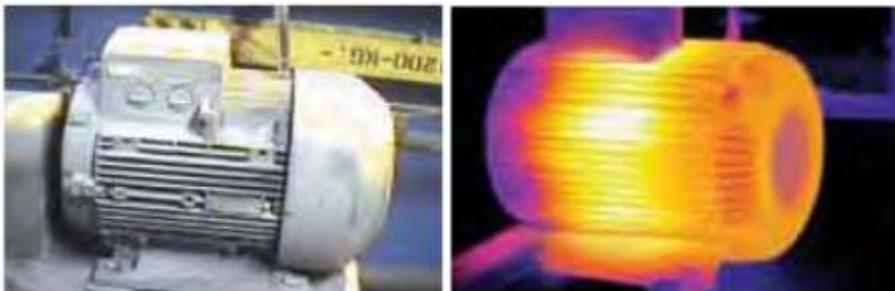


Figure 12-3 : Problème d'enroulement interne dans un moteur

En règle générale, lorsque les composants mécaniques sont usés et moins efficace, la chaleur dissipée augmente. En conséquence, la température de

l'équipement ou des systèmes défectueux va augmenter rapidement avant la panne.

En comparant périodiquement à partir d'un appareil photo d'imagerie thermique les lectures des conditions d'exploitation avec la signature de la température d'une machine dans des conditions normales, vous pouvez détecter une multitude de défauts.

Les moteurs peuvent également être contrôlés par une caméra à imagerie thermique.

Les défaillances des moteurs comme l'usure de contact et les courts-circuits généralement produisent un excès de chaleur avant la panne, mais restent non détectés avec l'analyse des vibrations, car souvent elle provoque peu ou aucune vibration supplémentaire. L'imagerie thermique donne un aperçu complet et vous permet de comparer la température des différents moteurs.

D'autres systèmes mécaniques contrôlés avec la caméra d'imagerie thermique comprennent les accouplements, les réducteurs, les roulements, les pompes, les compresseurs, les courroies, les ventilateurs et les convoyeurs...

Des exemples de défauts mécaniques qui peuvent être détectés avec l'imagerie thermique sont:

- Problèmes de lubrification
- désalignements
- Moteurs surchauffés
- Pompes surchargées
- Essieux moteurs surchauffés
- Roulements chauds...

D. Tuyauterie

L'imagerie thermique donne également de précieux renseignements sur l'état de l'isolation des tubes et des vannes.

Inspection de l'état du matériau d'isolation entourant la tuyauterie peut être cruciale. Les pertes de chaleur dues au défaut d'isolation apparaissent très clairement dans l'image thermique, vous permettant de rapidement réparer le manque d'isolation et d'éviter les pertes d'énergie importantes ou d'autres dommages.

Les vannes de processus sont un autre bon exemple des équipements connexes de la tuyauterie qui sont souvent inspectés avec des caméras d'imagerie thermique. Outre la détection de fuite à l'aide d'une caméra à imagerie thermique peut également être utilisé pour déterminer si la vanne est ouverte ou fermée, même à travers une distance.

Des exemples de défauts de tuyauteries qui peuvent être détectés avec l'imagerie thermique sont:

- fuite dans les pompes, les tuyaux et les vannes,
- Pannes d'isolation,
- blocage des tuyaux.

E. Autres applications

L'imagerie thermique peut aussi être facilement utilisée pour la détection du niveau dans les cuves.

Dû aux effets d'émissivité ou à des différences de température l'image thermique montre clairement le niveau du liquide.

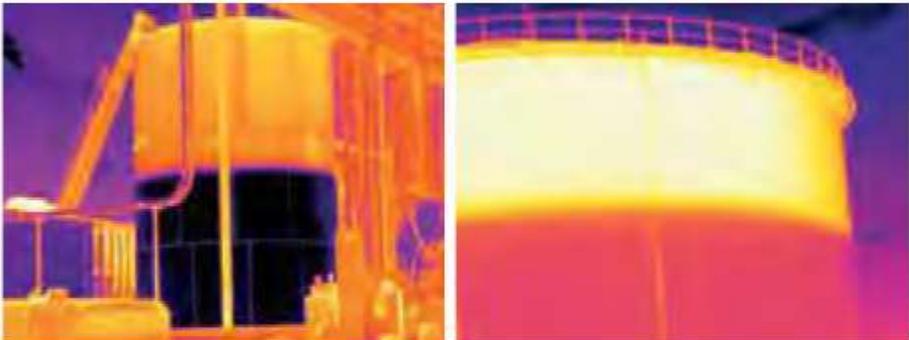


Figure 12-4 : Niveau des liquides dans les réservoirs de stockage.

D'autres applications incluent:

- Trouver les points chauds dans les robots de soudage,
- Inspection du matériel aéronautique,
- Inspection des moules...

F. Démarche d'inspections thermiques

Lorsque vous disposez d'une caméra thermique l'inspection peut commencer. La question se pose par où allez-vous commencer?

1. Définir la tâche

En premier lieu il faut définir la tâche, en fixant la liste de tous les équipements que vous souhaitez surveiller. La prochaine étape serait de donner la priorité à la liste. La plupart des entreprises dispose des historiques d'entretien et de production.

Ces dossiers peuvent indiquer quel appareil est le plus favorisé à l'échec et donc mérite un examen attentif. Veuillez également prendre en compte la conséquence directe de l'échec; les équipements vitaux doivent être surveillés plus souvent et de plus près que les équipements qui peuvent être temporairement hors service sans pour autant entraver la fonctionnalité de tout le processus.

Sur la base de cette information, vous pouvez commencer à mettre en place un planning pour les inspections thermographiques.

2. Prise d'image thermique (Camera)

Avant de pouvoir commencer à diagnostiquer les problèmes dans votre équipement, vous avez besoin du matériel de référence. Nous vous conseillons donc de prendre des images thermiques de tous les équipements que vous visez à inspecter. Ceci doit être fait pendant le fonctionnement normal.

Noter que dans certains cas, vous pourriez avoir à capturer des multiples images thermiques d'une pièce d'équipement, en particulier si elle a les composants ou sous-systèmes clés qui sont sujettes à l'échec.

Etape 1

- Définir une plage de température de sorte qu'il comprend les températures que vous attendez à mesurer.

Etape 2

Position et champ de vision:

- Vérifiez les réflexions (déplacer, si nécessaire).
- Vérifiez la résolution du point de mesure / taille de détail (se rapprocher, si nécessaire et possible)...

Etape 3

- Focalisez ; Une image floue est non seulement non-professionnelle mais aussi conduit à des résultats de mesure erronés.

Etape 4

- Entrez les paramètres de mesure: Émissivité, Température apparente réfléchie.

Etape 5

- Enregistrez les images thermique et visible.

3. Analyse et rédaction du rapport

Lorsque tout le matériel a été inspecté, il est temps de revenir au bureau pour faire l'analyse des images et de résumer les résultats dans un rapport. Le rapport vous permet de suivre avec précision la performance thermique de votre équipement au fil du temps avec des tableaux et des graphiques faciles à comprendre.

Une section d'information générale devrait être incluse dans le rapport global pour établir une compréhension de base des conditions de l'enquête.

A. Informations générales

1. Identifier le technicien (s) et organisation chargée de l'enquête.
2. Fournir une identification pour le technicien (certification en thermographie infrarouge, formation à la sécurité, y compris un cours sur les règlements norme NFPA 70E et OSHA ...)
3. Documenter le cadre global de l'enquête la date et le climat.
4. Numéro de référence et les données d'étalonnage pour l'équipement de la thermographie et tout autre équipement utilisé dans l'enquête.
5. Les critères utilisés pour identifier les problèmes potentiels.

B. Informations spécifiques

1. Numéro de référence ou d'identification de l'équipement contrôlé, la date ou l'heure d'installation.
2. Photo de l'équipement avec thermographe.
3. Réglages de l'appareil thermographique pour chaque image thermographique
 - a. Mesure de l'émissivité
 - b. Cartographie de l'émissivité ou une table? identifier les tables.
 - c. Distance de l'équipement.
 - d. Champ de vision instantané ou agrandissement multiplicateur.
4. Définir la température de référence.
5. Fournir une explication de la façon dont le rayonnement réfléchi a été traité pour les organes de faible d'émissivité.

6. Environnement d'exploitation
 - a. La température ambiante à proximité du matériel. La température à l'extérieur pendant l'hiver peut être beaucoup plus frais, soit l'impact sur la performance thermique de l'équipement.
 - b. Endroit sec, humide, mouillé, taux d'humidité, l'huile, la poussière.
7. Date et heure ou le dispositif a été étudié.
8. Signes identifiés de dommages ou de surchauffe. Les signes de dommages physiques ou dommages thermiques en vigueur au moment de l'enquête fournira la bonne documentation si un composant est retiré pour examen et il est découvert en outre que l'équipement est endommagé.
9. Histoire de l'équipement (identifier un entretien, la réparation ou le remplacement du matériel à contrôler).

Evaluation : QCM

1. Qu'est-ce que l'image thermique montre?
 - La Chaleur par mètre carré
 - La distribution de la température
 - La Radiation
 - La transmission
2. Quels sont les objets qui émettent de la chaleur?
 - Seuls les objets qui ne reflètent pas
 - Seuls les solides
 - Seuls les objets à une température supérieure à 0 ° C
 - Tous les objets ayant une température supérieure au zéro absolu
3. Quelle est l'émissivité?
 - Une mesure de la capacité d'une surface à émettre un rayonnement IR
 - Une mesure de la couleur d'une surface
 - Une mesure de la température d'une surface
 - Une constante d'un matériau
4. En quoi elle sert la haute résolution IR?
 - Eviter la saturation dans l'image
 - Se débarrasser des réflexions
 - Etre capable de repérer les petites cibles à des distances plus longues
 - L'amélioration de l'étalonnage de la caméra
5. Quelle est la température apparente réfléchie?
 - La somme de la température de tous les objets dans les alentours
 - Le rayonnement provenant de l'environnement qui est réfléchi par la cible dans la caméra thermique
 - Réflexions ponctuelles

- Toutes les réflexions qui sont plus chauds que la température de l'objet.
6. Quels sont les paramètres que vous devez configurer correctement si vous voulez mesurer la température réelle d'un objet?
- Le point de mesure
- L'émissivité
- Température apparente réfléchie
- Émissivité et la température apparente réfléchie
7. Quand pouvez-vous voir le niveau de remplissage des réservoirs avec une caméra thermique?
- Lors d'une journée pluvieuse
- Lorsqu'il existe une différence de température entre le liquide et l'air au-dessus
- Lorsque le réservoir est plus qu'à moitié rempli
- Lorsque le réservoir est peint en noir
8. Quelle est la raison typique pour un modèle thermique?
- Conduction
- Réflexion
- Convection
- Tous les trois peuvent causer des modèles thermiques
9. Quelle est la caractéristique d'une bonne image thermique?
- Elle utilise une gamme de température appropriée
- Elle est focalisée
- Elle est prise d'une bonne position par rapport à la réflexion et la taille du spot
- Tout ce qui précède sont importants
10. Comment pouvez-vous améliorer la présentation de l'image lors de l'utilisation du logiciel?

- En sélectionnant une palette appropriée et l'adaptation de l'échelle de température
- En modifiant le réglage d'émissivité
- En modifiant le réglage de la température apparente réfléchie
- En changeant l'orientation

11. Résolution IR élevé (plus de pixels) permet

- Pour mesurer des cibles plus petites
- Pour éviter les problèmes avec émissivité
- Pour mesurer des objets froids
- D'ignorer la température apparente réfléchie

12. Qu'est-ce qui se passera si vous définissez une valeur d'émissivité incorrecte?

- Vous ne verrez que des réflexions
- Vous serez toujours mesurer la température exacte si l'objet est assez chaud.
- La lecture de la température sera incorrecte
- Rien, tant que la température apparente réfléchie est définie

13. À travers lequel des matériaux suivants le rayonnement infrarouge passe?

- Verre
- Eau
- Air
- Brique

14. Le rayonnement infrarouge et la lumière visible sont des formes de :

- Énergie mécanique
- Rayonnement électromagnétique
- Froid
- Puissance nucléaire

15. Qu'elle règle suit le mécanisme de réflexion?

- Rayonnement infrarouge se reflète comme la lumière visible
- Réflexion se produit uniquement à 90°
- « Angle d'entrée » est égal à « Angle de sortie »
- La réflexion se produit uniquement à des longueurs d'onde visibles

16. Quand la saturation se produit dans l'image thermique?

- Lorsqu'on mesure des températures supérieures à 100°C
- Lorsqu'on mesure des températures au-dessus de la plage de température qui est sélectionné dans la caméra thermique
- Lorsque vous utilisez le réglage manuel de l'échelle de température
- Lorsque l'on regarde les objets avec un contraste élevé thermique

17. Lequel des éléments suivants est un bon émetteur?

- Métal brillant
- Cuivre poli
- Béton
- Un cadre de fenêtre en aluminium

18. Lorsque l'on regarde un objet avec une caméra thermique nous recevons rayonnement qui est émis directement à partir de l'objet ainsi que le rayonnement réfléchi par les sources environnantes. Dont une partie est liée à la température de l'objet?

- La somme des deux parties (de rayonnement émis et réfléchi)
- La partie réfléchi
- La moyenne des deux parties
- Le rayonnement qui est émis directement

19. Il est facile de mesurer la température réelle d'un objet avec une émissivité élevée car :

- La partie réfléchie du rayonnement total atteignant la caméra est négligeable
- L'objet reflète principalement les environs
- Les réflexions seront absorbées
- Il n'y aura pas de réflexions

20. Qu'est-ce qui va se passer lorsque l'image thermique ne se concentre pas?

- Il n'y aura pas de réflexions
- La lecture de la température sera mal
- L'émissivité va changer
- L'échelle de température se verrouille

Testez vos connaissances

Placer chaque terme devant sa définition.

A	Emetteur	F	Transfert thermique	K	Delta T
B	Température	G	Radiation	L	Réflecteur
C	Thermographie IR	H	Anomalie	M	Convection
D	Loi de Kirchhoff	I	Transmetteur	N	FoRD
E	Conduction	J	Chaleur		

I	Chaleur détecté à travers un objet
J	Energie créée par le mouvement des molécules
C	Une représentation graphique de la chaleur
A	Un bon absorbeur d'énergie
D	$E+T+R=1$
L	Un pauvre émetteur d'énergie
M	Transfert thermique à travers un fluide
E	Transfert thermique entre deux solides
F	Déplacement de la haute température vers la basse température
B	Mesure de la quantité de chaleur
K	Différence de température
H	Quelque chose différent de la normale
G	Transfert d'énergie à travers des ondes électromagnétiques
N	Focus, Range and Distance

Bibliographie

- [1]. IR Automation Guidebook, Temperature Monitoring and Control with IR Cameras, Published by FLIR Systems Incorporated, 2008, www.goinfrared.com
- [2]. Basics of non-contact temperature measurement, Micro-Epsilon, www.micro-epsilon.com
- [3]. Thermal imaging guidebook for industrial applications, This booklet is produced in close cooperation with the Infrared Training Centre (ITC), 2011, www.instrumentsgroup.co.za
- [4]. A Basic Guide to Thermography, Land Instruments International, 2004, www.landinst.com
- [5]. 10 Things You Need To Know About Infrared Windows, by IRISS inc. 2009. www.iriss.com
- [6]. Les ondes électromagnétiques des plus courtes aux plus longues, KAMIL FADEL, Découverte N°295 Février 2002.
- [7]. Thermographie Principes et mesure, Dominique PAJANI Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle, R2740.
- [8]. Thermographie : Technologies et applications, Dominique PAJANI et Luc AUDAIRE ; Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle, R2741.
- [9]. Introduction to Thermographic Analysis, Jason Michael Mais, SKF Reliability Systems @ptitudeXchange, April 2002. www.aptitudexchange.com

- [10]. Guide d'imagerie thermique pour applications industrielles
<http://www.instrumentsgroup.co.za/>
- [11]. <http://www.steves-digicams.com/>

Annexe partie A

Tableau 0-1 : Amplitude des vibrations selon ISO 10816

$V_{eff} [mm / s]$	Types de Machines							
	$15 \leq P \leq 300kW$ (1) $160 < H < 315mm$ (2)		$0.3 \leq P \leq 50MW$ (1) $H > 315mm$ (2)		Pompes $P > 15kW$		Motopompes $P > 15kW$	
	Rigide	Souple	Rigide	Souple	Rigide	Souple	Rigide	Souple
0.0 à 1.4	A	A	A	A	A	A	A	A
1.4 à 2.3	B	A	A	A	A	A	B	A
2.3 à 2.8	B	B	B	A	B	A	B	B
2.8 à 3.5	C	B	B	A	B	A	C	B
3.5 à 4.5	C	B	B	B	B	B	C	B
4.5 à 7.1	D	C	C	D	C	B	D	C
7.1 à 11.0	D	D	D	C	D	C	D	D
11.0 à ...	D	D	D	D	D	D	D	D

(1) P Puissance des machines industrielles autres que les pompes ou motopompes
 (2) H Hauteur d'arbre des moteurs électriques

- A : Bon
- B : Acceptable
- C : A peine tolérable pour fonctionnement de courte durée
- D : Vibration suffisamment importantes pour endommager la machine à court terme.

Tableau A-2 : Usage général selon la puissance et la suspension ISO 2372

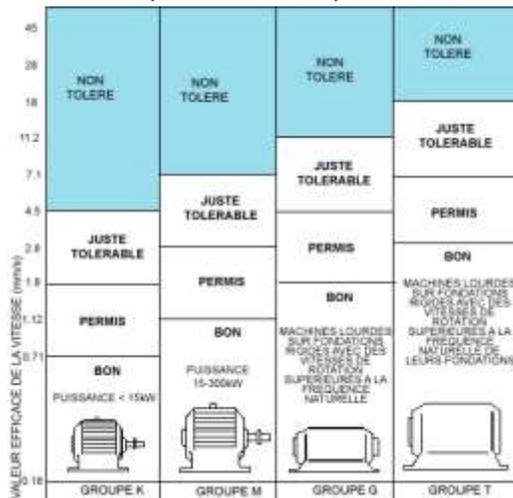


Tableau A-3 Schéma d'appréciation de la sévérité

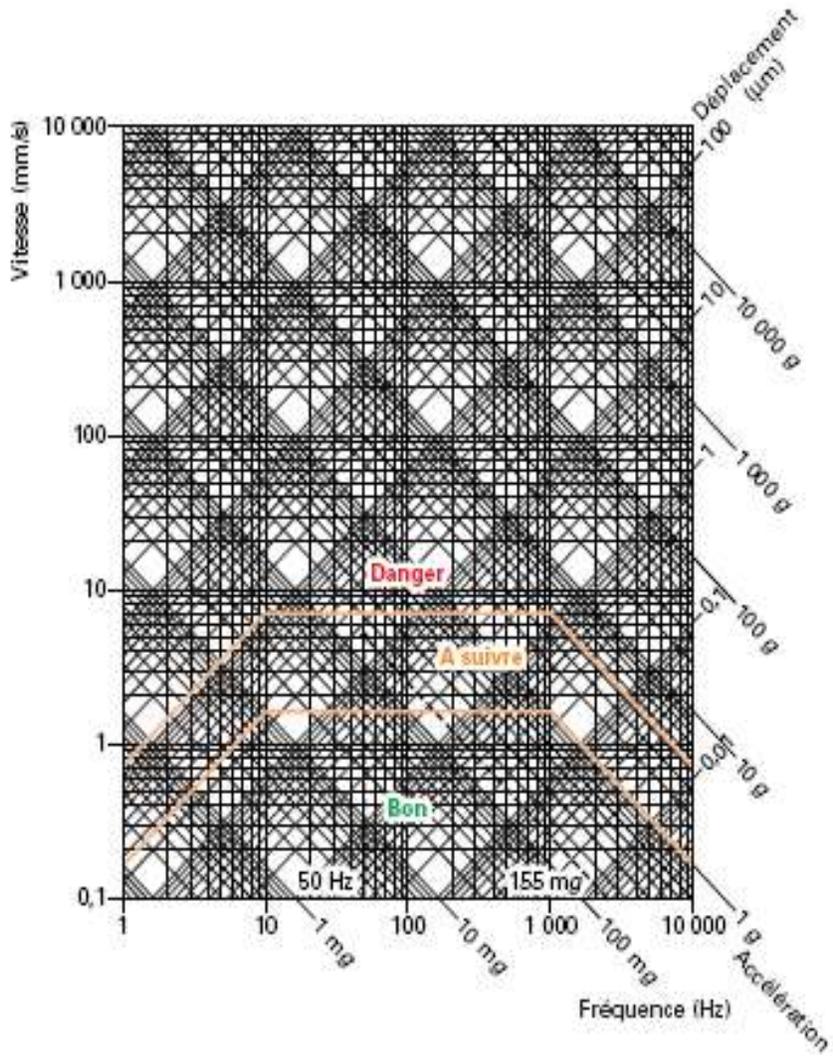


Tableau 0-4 : Critère de sévérité en accélération

Accélération efficace (g)	Sévérité
<0.3	Excellent
0.3 à 1	Bon
1 à 3	Correct
3 à 6	Pré-alarme
6 à 10	Alarme d'urgence
>10	Arrêt d'urgence

Tableau A-5 : Amplitude des vibrations en dB [14]

Accélération A (dB) = $20 \log \frac{A}{A_0}$		
Niveau	A (dB)	$\frac{A}{A_0}$
Danger	20	10
	10	3.16
	8	2.51
Alerte	6	2
	3	1.41
	1	1.12
Référence	0	1.00
	-1	0.89
	-3	0.71
	-6	0.50
	-8	0.40
	-10	0.32
	-20	0.10

Annexe partie B

Tableau 0-1: Grade de viscosité (Norme ISO-NF)

Grade ISO	Viscosité cinématique médiane à 40 °C	Limites de viscosité	
		minimum	maximum
2	2,2	1,90	2,42
3	3,2	2,88	3,52
5	4,6	1,14	5,06
7	6,8	6,12	7,48
10	10	9,00	11,00
15	15	13,50	16,50
22	22	19,00	24,20
32	32	28,80	35,20
46	46	41,40	50,60
68	68	61,20	74,80
100	100	90,00	110,00
150	150	135,00	165,00
220	220	198,00	242,00
320	320	288,00	352,00

Tableau 0-2 : Valeur de L et H pour le calcul de l'IV

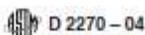


TABLE 1 Basic Values for L and H for Kinematic Viscosity In 40 to 100°C System.

Kinematic Viscosity at 100°C, mm ² /s (cSt)	L		Kinematic Viscosity at 100°C, mm ² /s (cSt)	L		Kinematic Viscosity at 100°C, mm ² /s (cSt)	L		Kinematic Viscosity at 100°C, mm ² /s (cSt)	L		Kinematic Viscosity at 100°C, mm ² /s (cSt)	L	
	L	H		L	H		L	H		L	H		L	H
2.00	7.994	6.394	7.00	78.50	48.57	12.0	201.9	108.0	17.0	369.4	190.2	24.0	693.9	301.8
2.10	8.640	6.894	7.10	86.25	49.61	12.1	204.8	109.4	17.1	373.3	191.7	24.2	694.5	305.6
2.20	9.309	7.410	7.20	92.39	50.69	12.2	207.8	110.7	17.2	377.1	193.3	24.4	704.2	309.4
2.30	10.00	7.944	7.30	94.33	51.78	12.3	210.7	112.0	17.3	381.0	194.9	24.6	714.9	313.0
2.40	10.71	8.498	7.40	96.86	52.85	12.4	213.6	113.3	17.4	384.9	196.5	24.8	725.7	317.0
2.50	11.45	9.063	7.50	99.85	53.98	12.5	216.6	114.7	17.5	388.9	198.1	25.0	736.5	320.9
2.60	12.21	9.647	7.60	91.54	55.09	12.6	219.6	116.0	17.6	392.7	199.7	25.2	747.2	324.9
2.70	13.00	10.26	7.70	93.20	56.20	12.7	222.6	117.4	17.7	396.7	191.3	25.4	758.2	328.8
2.80	13.80	10.87	7.80	96.43	57.31	12.8	225.7	118.7	17.8	400.7	192.9	25.6	769.3	332.7
2.90	14.63	11.50	7.90	97.72	58.43	12.9	228.8	120.1	17.9	404.8	194.6	25.8	779.7	336.7
3.00	15.49	12.15	8.00	100.0	59.60	13.0	231.9	121.5	18.0	408.9	196.2	26.0	790.4	340.5
3.10	16.38	12.82	8.10	102.3	60.74	13.1	235.0	122.9	18.1	412.9	197.8	26.2	801.6	344.4
3.20	17.28	13.51	8.20	104.6	61.89	13.2	238.1	124.2	18.2	416.7	199.4	26.4	812.8	348.4
3.30	18.18	14.21	8.30	106.9	63.05	13.3	241.2	125.6	18.3	420.7	201.0	26.6	824.1	352.3
3.40	19.12	14.93	8.40	109.2	64.18	13.4	244.3	127.0	18.4	424.8	202.6	26.8	835.5	356.4
3.50	20.08	15.68	8.50	111.5	65.39	13.5	247.4	128.4	18.5	429.0	204.3	27.0	847.0	360.5
3.60	21.06	16.46	8.60	113.8	66.48	13.6	250.5	129.8	18.6	433.2	205.9	27.2	857.5	364.6
3.70	22.06	17.28	8.70	116.2	67.64	13.7	253.8	131.2	18.7	437.3	207.6	27.4	869.0	368.8
3.80	23.13	17.97	8.80	118.5	68.78	13.8	257.0	132.6	18.8	441.5	209.3	27.6	880.6	373.0
3.90	24.19	18.77	8.90	120.9	69.94	13.9	260.1	134.0	18.9	445.7	211.0	27.8	892.3	377.4
4.00	25.32	19.58	9.00	123.3	71.10	14.0	263.3	135.4	19.0	449.9	212.7	28.0	904.1	380.6
4.10	26.50	20.37	9.10	125.7	72.27	14.1	266.6	136.8	19.1	454.2	214.4	28.2	915.8	384.8
4.20	27.73	21.21	9.20	128.0	73.42	14.2	269.9	138.2	19.2	458.4	216.1	28.4	927.6	388.9
4.30	29.07	22.09	9.30	130.4	74.57	14.3	273.0	139.6	19.3	462.7	217.7	28.6	939.6	393.0
4.40	30.46	22.92	9.40	132.8	75.73	14.4	276.3	141.0	19.4	467.0	219.4	28.8	951.2	396.6
4.50	31.96	23.81	9.50	135.3	76.91	14.5	279.6	142.4	19.5	471.3	221.1	29.0	963.4	401.1
4.60	33.52	24.71	9.60	137.7	78.08	14.6	283.0	143.9	19.6	475.7	222.8	29.2	975.4	405.3
4.70	35.13	25.63	9.70	140.1	79.27	14.7	286.4	145.3	19.7	479.7	224.5	29.4	987.1	409.5
4.80	36.79	26.57	9.80	142.7	80.48	14.8	289.7	146.8	19.8	483.9	226.2	29.6	999.9	413.5
4.90	38.50	27.53	9.90	145.2	81.67	14.9	293.0	148.2	19.9	488.9	227.7	29.8	1011	417.8
5.00	40.25	28.60	10.0	147.7	82.87	15.0	296.5	149.7	20.0	493.2	229.5	30.0	1023	421.7
5.10	41.99	29.46	10.1	150.3	84.08	15.1	300.0	151.2	20.2	501.5	233.0	30.5	1055	432.4
5.20	43.78	30.43	10.2	152.9	85.30	15.2	303.4	152.6	20.4	510.8	236.4	31.0	1086	443.2
5.30	45.53	31.40	10.3	155.4	86.51	15.3	306.9	154.1	20.6	519.9	240.1	31.5	1119	454.0
5.40	47.21	32.37	10.4	158.0	87.72	15.4	310.3	155.6	20.8	529.8	243.5	32.0	1151	464.9
5.50	49.00	33.34	10.5	160.6	88.95	15.5	313.8	157.0	21.0	538.4	247.1	32.5	1184	475.8
5.60	50.87	34.32	10.6	163.2	90.19	15.6	317.5	158.6	21.2	547.5	250.7	33.0	1217	487.0
5.70	52.64	35.26	10.7	165.8	91.40	15.7	321.1	160.1	21.4	556.7	254.2	33.5	1251	498.1
5.80	54.42	36.26	10.8	168.5	92.65	15.8	324.6	161.6	21.6	566.4	257.8	34.0	1286	509.6
5.90	56.20	37.23	10.9	171.2	93.92	15.9	328.3	163.1	21.8	575.8	261.5	34.5	1321	521.1
6.00	57.97	38.19	11.0	173.9	95.19	16.0	331.9	164.6	22.0	585.2	264.9	35.0	1356	532.5
6.10	59.74	39.17	11.1	176.6	96.48	16.1	335.5	166.1	22.2	595.0	268.8	35.5	1391	544.0
6.20	61.52	40.15	11.2	179.4	97.71	16.2	339.2	167.7	22.4	604.3	272.3	36.0	1427	555.6
6.30	63.32	41.13	11.3	182.1	98.97	16.3	342.9	169.2	22.6	614.2	275.6	36.5	1464	567.1
6.40	65.18	42.14	11.4	184.9	100.2	16.4	346.6	170.7	22.8	624.1	279.6	37.0	1501	579.3
6.50	67.12	43.18	11.5	187.8	101.5	16.5	350.3	172.3	23.0	633.8	283.3	37.5	1538	591.3
6.60	69.16	44.24	11.6	190.4	102.8	16.6	354.1	173.8	23.2	643.4	286.8	38.0	1575	603.1
6.70	71.29	45.33	11.7	193.3	104.1	16.7	358.0	175.4	23.4	653.8	290.5	38.5	1613	615.0
6.80	73.48	46.44	11.8	196.2	105.4	16.8	361.7	177.0	23.6	663.3	294.4	39.0	1651	627.1
6.90	75.72	47.51	11.9	199.0	106.7	16.9	365.6	178.6	23.8	673.3	297.9	39.5	1691	639.2
40.0	1730	851.8	67.5	4580	1471	40.0	1770	864.2	68.0	4645	1488	41.0	1810	876.6
40.5	1770	864.2	68.0	4645	1488	41.0	1810	876.6	68.5	4709	1506	41.5	1851	889.1
42.0	1892	971.8	69.5	4839	1541	42.0	1920	930.0	70.0	4905	1556			

Tableau 0-3 : Classe de propreté typique selon ISO 4406 : 1999

nombre de particules par 100 ml						Code		
> 4 µm		> 5 µm		> 15 µm		seul. APC*		
de	à	de	à	de	à			
4'000'000	8'000'000	500'000	1'000'000	64'000	130'000	23 /	20 /	17
2'000'000	4'000'000	250'000	500'000	32'000	64'000	22 /	19 /	16
1'000'000	2'000'000	130'000	250'000	16'000	32'000	21 /	18 /	15
500'000	1'000'000	64'000	130'000	8'000	16'000	20 /	17 /	14
250'000	500'000	32'000	64'000	4'000	8'000	19 /	16 /	13
130'000	250'000	16'000	32'000	2'000	4'000	18 /	15 /	12
64'000	130'000	8'000	16'000	1'000	2'000	17 /	14 /	11
32'000	64'000	4'000	8'000	500	1'000	16 /	13 /	10
16'000	32'000	2'000	4'000	250	500	15 /	12 /	9
8'000	16'000	1'000	2'000	130	250	14 /	11 /	8
4'000	8'000	500	1'000	64	130	13 /	10 /	7
2'000	4'000	250	500	32	64	12 /	9 /	6
1'000	2'000	130	250	16	32	11 /	8 /	5
500	1'000	64	130	8	16	10 /	7 /	4

*Code à trois chiffres uniquement utilisé avec compteur à particules automatique (ACP)



16 / 13 / 10



19 / 16 / 13



20 / 17 / 14



22 / 19 / 16

Concentration maximale en particules [particules/100 ml]							
Taille ISO 4402 Etalonnage ou comptage optique*	> 1 µm	> 5 µm	> 15 µm	> 25 µm	> 50 µm	> 100 µm	
Taille ISO 11171, Etalonnage ou microscope électronique**	> 4 µm _{iso}	> 6 µm _{iso}	> 14 µm _{iso}	> 21 µm _{iso}	> 38 µm _{iso}	> 70 µm _{iso}	
Codage des tailles	A	B	C	D	E	F	
Classes	000	195	76	14	3	1	0
	00	390	152	27	5	1	0
	0	780	304	54	10	2	0
	1	1.560	609	109	20	4	1
	2	3.120	1.220	217	39	7	1
	3	6.250	2.430	432	76	13	2
	4	12.500	4.860	864	152	26	4
	5	25.000	9.730	1.730	306	53	8
	6	50.000	19.500	3.460	612	106	16
	7	100.000	38.900	6.920	1.220	212	32
	8	200.000	77.900	13.900	2.450	424	64
	9	400.000	156.000	27.700	4.900	848	128
	10	800.000	311.000	55.400	9.800	1.700	256
11	1.600.000	623.000	111.000	19.600	3.390	1.020	
12	3.200.000	1.250.000	222.000	39.200	6.780		

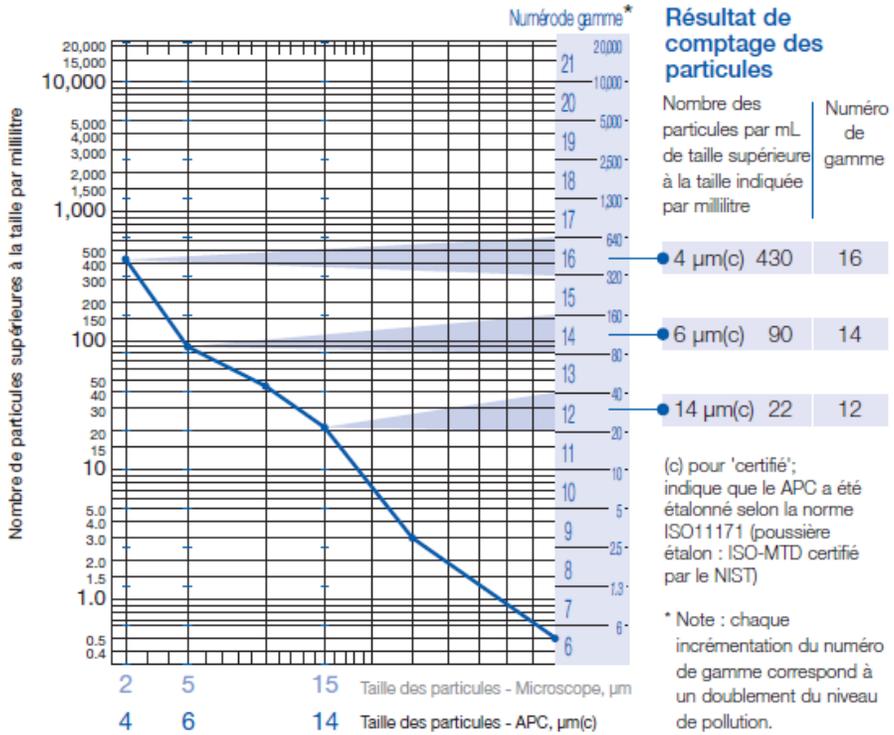
Tableau 0-4 : Conductivité des fluides et huiles synthétiques à 23 ° C

LUBE OIL AND CIRCULATING OIL	PS/M	HYDRAULIC OIL	PS/M
Gear oil	>2,000	Mobile hydraulics (Bio)	800
Steam turbine oil	13	Industry hydraulics (ZnDTP)	250-2,000
Gas turbine oil (PAO)	1,200	Industry hydraulics (ester)	>2,000
Gas turbine oil (ester)	1,500	Phosphoric acid ester (airplane)	>2,000
SAE 10W-40	>2,000	Airplane hydraulics synthetic	29
Manual transmission gear oil	>2,000	Synthetic	9
Paper machine oil (Zn-P)	350	Aircraft PAO	70
Paper machine oil (S-P)	10		
Silicate ester (refrigeration)	1,500	Insulating fluids	12

Tableau 0-5 : Principale normes associées à la filtration et au contrôle de pollution

ISO 2941	Éléments filtrants - vérification de la résistance à l'écrasement ou à l'éclatement
ISO 2942	Éléments filtrants - vérification de la conformité de fabrication et détermination du point de première bulle
ISO 2943	Éléments filtrants - vérification de la compatibilité des matériaux avec les fluides
ISO 3722	Flacons de prélèvement - homologation et contrôle des méthodes de nettoyage
ISO 3724	Éléments filtrants - vérification des caractéristiques d'un filtre par un essai de fatigue due au débit
ISO 3968	Filtres - évaluation de la perte de charge en fonction du débit
ISO 4021	Prélèvement des échantillons de fluide dans les circuits en fonctionnement
ISO 4405	Détermination de la pollution particulaire par la méthode gravimétrique
ISO 4406	Méthode de codification du niveau de pollution particulaire solide
ISO 4407	Détermination de la pollution particulaire par comptage au microscope optique
ISO 10949	Propreté des composants - lignes directrices pour l'obtention et le maintien de la propreté des composants de leur fabrication jusqu'à leur installation
ISO 11170	Éléments filtrants - ordre des essais pour la vérification des caractéristiques de performance
ISO 11171	Étalonnage des compteurs automatiques de particules en suspension dans les liquides
ISO 11500	Détermination de la pollution particulaire par comptage automatique à absorption de lumière
ISO 11943	Systèmes de comptage automatique en ligne de particules en suspension dans les liquides - Méthodes d'étalonnage et de validation
ISO 16889	Éléments filtrants - évaluation des performances par la méthode de filtration en circuit fermé
ISO 18413	Propreté des composants - documents de contrôle et principes d'extraction et d'analyse des polluants et d'expression des
ISO 23181	Éléments filtrants - détermination de la résistance à la fatigue due au débit grâce à des fluides très visqueux
SAE ARP4205	Éléments filtrants - méthode d'évaluation de l'efficacité dynamique avec un débit cyclique

Tableau 0-6 : Code de pollution ISO 4406



Le code ISO 4406 indique le nombre de particules supérieures à 4, 6 et 14 µm(c) dans un millilitre de fluide échantillonné.

Le système de codification ISO 4406 permet une représentation graphique de la pollution particulaire telle que mesurée dans l'échantillon de fluide. Le numéro de la gamme disponible sur la droite du graphique, indique le code de la pollution correspondant à chacune des trois tailles de particules.

Annexe partie C

Tableau 0-1 : Températures de fonctionnement admissibles des différents lubrifiants pour roulements [www.skf.com]

Lubrifiant	Température de fonctionnement admissible ⁽¹⁾
Huiles minérales	
Huiles sans additifs EP, par ex. huiles machines ou hydrauliques	120 °C
Huiles avec additifs EP, par ex. huiles pour réducteurs industriels et boîtes de vitesse automobiles	110 °C
Huiles avec additifs EP, par ex. huiles pour ponts arrière et différentiels (automobile), huiles pour engrenages hypoides	100 °C
Huiles synthétiques	
Polyglycols, poly-alpha-oléfines	120 °C
Diesters, silicones	110 °C
Esterphosphoriques	80 °C
Graisses	
Graisses au lithium	120 °C
Graisses polyurée, bentonite, calcium complexe	120 °C

Pour les graisses à savons de sodium et de calcium et les autres graisses avec une température de fonctionnement inférieure à 120 °C, la température maximale de la cage en polyamide est identique à la température de fonctionnement maximale de la graisse.

(1) Mesurée sur la surface extérieure de la bague extérieure

Tableau 0-2 : Température maximale d'exploitation des polymères [www.goodfellow.com]

Matériau	Formule	Temp. de déflexion à la chaleur - 0,45 MPa C	Temp. de déflexion à la chaleur - 1,8 MPa C	Temp. maximale d'exploitation C
Acétate de cellulose	CA	52-105	48-86	55-95
Acétate-Butyrate de cellulose	CAB	73	62	60-100
Cellulose	Cellulose régénéré	-	-	-
Copolymère d'Acrylonitrile/Méthylacrylate	Barex® Copolymère à impact	77	69	-
Copolymère d'Éthylène Propylène Fluoré	FEP	50	70	150 - 200
Copolymère d'Éthylène-chlorotrifluoroéthylène	E-CTFE	115	75	130-170
Copolymère d'Éthylène-tetrafluoroéthylène	ETFE	105	70	150-160
Copolymère de fluorure d'Hexafluoropropylènevinylidène	FKM	-	-	220 à 300
Cyclo-olefin copolymer	Topas®	130	-	-
Elastomère de Silicone	MQ /VNQ /PMQ /PVMQ	-	-	200-260
Oxyde de Polyphénylène	PPO (modifié), PPE (modifié)	137	125	80-120
Oxyde de Polyphénylène (transformé), chargé à 30% fibre de verre	PPO - 30% GFR	165	135	90-160
Poly L lactic acid - Biopolymer	PLLA	-	-	50
Polyacrylonitrile-butadiène-styrène	ABS	98	89	70-100
Polyamide - Nylon 4, 6	PA 4,6	220	160	100-200
Polyamide - Nylon 6	PA 6	200	80	80-160
Polyamide - Nylon 6, 6	PA 6,6	200	100	80-180
Polyamide - Nylon 11	PA 11	150	55	70-130
Polyamide - Nylon 12	PA 12	130-135	48-55	-

Polyamide/imide	PAI	-	278-9	200-260
Polyaramide	Polymetaphénylène isophthalamide	-	149	200 - 300
Polyaramide	Polyparaphénylène téréphtalamide	-	-	180-245
Polybenzimidazole	PBI	435	-	260-400
Polybutylène téréphtalate - Renforcé à 30% de fibre de verre	PBT - 30 % GFR	220	200	120-200
Polybutylène téréphtalate	PBT	150	60	120-?
Polycarbonate - 30% fibre de verre	PC - 30% GFR	147	142	140
Polycarbonate - chargé à 30% de fibre de Carbone	PC - 30% CFR	-	-	130
Polychlorotrifluoroéthylène	PCTFE	126	-	120-149
Polychlorure de Vinyle - non plastifié	UPVC	70	67	50-75
Polychlorure de Vinylidène	PVDC	-	-	80-100
Polyéthercétonecétone	PEKK	-	175	260
Polyétherimide	PEI	200	190	170-200
Polyéthylène - basse densité	PEFD	50	35	50-90
Polyéthylène - U.H.M.W.	UHMW PE	69	42	55-95
Polyéthylène naphthalate	PEN	-	-	155
Polyéthylène téréphtalate	Polyester, PET, PETP	115	80	115-170
Polyfluorure de Vinyle	PVF	120	80	150 - 200
Polyfluorure de Vinylidène	PVDF	120-150	80-115	135-150
Polyhydroxybutyrate - Biopolymère	PHB	-	-	95
Polyhydroxybutyrate/Polyhydroxyvalérate 8% - Biopolymère	PHB92 /PHV 8	-	-	-
Polyhydroxybutyrate/Polyhydroxyvalérate 12% - Biopolymère	PHB88 /PHV12	-	-	-
Polyimide	PI	-	360	250-320
Polyméthylpentène	TPX®	100	40	75-115

Polyoxyméthylène - Copolymère	Acetal - Copolymère POMC	160	110	80-120
Polyoxyméthylène - Homopolymère	Acetal - Homopolymère POMH	170	135	80-120
Polyoxyméthylène/Acetal Copolymer - chargé à 10% de fibre de C	POMC - 10% CFR	-	-	100
Polyphénylsulphone	PPSu	210	200	180-210
Polypropylène	PP	100-105	60-65	90-120
Polystyrène	PS	90	80	50-95
Polystyrène - Conducteur	Polystyrène conducteur à impact élevé	-	85	-
Polystyrène - Réticulé	PS	-	-	93
Polytétrafluoroéthylène	PTFE	120	54	180-260
Polytétrafluoroéthylène chargé de verre	PTFE 75 / Verre 25	-	-	260
Sulfure de Polyphénylène	PPS	-	104	170
		-	-	-
Sulfure de Polyphénylène - chargé à 40 % de fibre de verre	PPS - 40% GFR	>260	240	200-260
Tetrafluoroéthylène-perfluoro(alkoxy vinyl éther) - copolymère	PFA	63-80	48-50	260
Tissu de Verre recouvert de Polytétrafluoroéthylène	PTFE 75 / Verre 25	-	-	260
Vectra A® - chargé à 15% fibre de verre	Polyester à cristaux liquides - 15% GFR	-	230	200-220
Vectra A® - chargé à 25% fibre de verre	Vectra A® - 25% GFR	227	165	-
Vectra A® - Polyester à cristaux liquides		220	180	200-220
Vectra A® - Renforcé à 30% de fibre de verre	Vectra A® - 30% GFR	250	235	200-220
Vectra B® - chargé à 30% fibre de Verre	Polyester à cristaux liquides - 30% GFR	-	235	200-220

Tableau 0-3 : Émissivité de divers matériaux

Material		Temperature °C	Emissivity ϵ
Silica	Granular powder	Normal temperature	0.48
	Silicon (silica gel), powder	do.	0.30
Slag	Boiler	0 to 100	0.97 to 0.93
		200 to 500	0.89 to 0.78
		600 to 1200	0.76 to 0.70
Snow			0.80
Stucco	Rough, lime	10 to 90	0.91
Tar			0.79 to 0.84
	Tar paper	20	0.91 to 0.93
Water	Film on metal surface	20	0.98
	Layer > 0.1mm thick	0 to 100	0.95 to 0.98
Brick	Red, rough	20	0.88 to 0.93
	Fireproof clay	20	0.85
		1000	0.75
		1200	0.59
	Fireproof corundum	1000	0.46
Refractory, strongly radiating	500 to 1000	0.80 to 0.90	
Refractory, weakly radiating	500 to 1000	0.65 to 0.75	
	Silica (95% SiO ₂) brick	1230	0.66

Material		Temperature °C	Emissivity ϵ
Aluminum	Polished	50 to 100	0.04 to 0.06
	Rough surface	20 to 50	0.06 to 0.07
	Strongly oxidized	50 to 500	0.20 to 0.3
	Aluminum bronze	20	0.6
	Aluminum oxide, pure, powder	Normal temperature	0.16
Brass	Dull, tarnished	20 to 350	0.22
	Oxidized at 600°C	200 to 600	0.59 to 0.61
	Polished	200	0.03
	Sheet, worked with emery	20	0.2
Bronze	Polished	50	0.1
	Porous, rough	50 to 150	0.55
Chromium	Polished	50	0.1
		500 to 1000	0.28 to 0.38
Copper	Commercial, burnished	20	0.07
	Electrolytic, carefully polished	80	0.018
	Electrolytic, powder	Normal temperature	0.76
	Molten	1100 to 1300	0.13 to 0.15
	Oxidized	50	0.6 to 0.7
	Oxidized to blackness	5	0.88
Iron	Covered with red rust	20	0.61 to 0.85
	Electrolytic, carefully polished	175 to 225	0.05 to 0.06
	Freshly worked with emery	20	0.24
	Oxidized	100	0.74
		125 to 525	0.78 to 0.82
	Hot rolled	20	0.77
Lead		130	0.60
	Gray, oxidized	20	0.28
	Oxidized at 200°	200	0.63
	Red, powder	100	0.93
	Lead sulfate, powder	Normal temperature	0.13 to 0.22
Mercury		0 to 100	0.09 to 0.12
Molybdenum		600 to 1000	0.08 to 0.13
	Filament	700 to 2500	0.10 to 0.30
Nichrome	Wire, clean	50	0.65
		500 to 1000	0.71 to 0.79
	Wire, oxidized	50 to 500	0.95 to 0.98
Nickel	Commercially pure, polished	100	0.045
		200 to 400	0.07 to 0.09
	Oxidized at 600°C	200 to 600	0.37 to 0.48
	Wire	200 to 1000	0.1 to 0.2
	Nickel oxide	500 to 650	0.52 to 0.59
	1000 to 1250	0.75 to 0.86	

Material		Temperature °C	Emissivity ϵ
Platinum		1000 to 1500	0.14 to 0.18
	Pure, polished	200 to 600	0.05 to 0.10
	Ribbon	900 to 1100	0.12 to 0.17
	Wire	50 to 200	0.06 to 0.07
		500 to 1000	0.10 to 0.16
Silver	Pure, polished	200 to 600	0.02 to 0.03
Steel	Alloy (8% Ni , 18% Cr)	500	0.35
	Galvanized	20	0.28
	Oxidized	200 to 600	0.80
	Oxidized strongly	50	0.88
		500	0.98
	Rolled freshly	20	0.24
	Rough plane surface	50	0.95 to 0.98
	Rusty, red	20	0.69
	Sheet, ground	950 to 1100	0.55 to 0.61
	Sheet, nickel-plated	20	0.11
	Sheet, polished	750 to 1050	0.52 to 0.56
	Sheet, rolled	50	0.56
	Stainless, rolled	700	0.45
	Stainless, sandblasted	700	0.70
Cast iron	Casting	50	0.81
	Ingots	1000	0.95
	Liquid	1300	0.28
	Oxidized at 600°C	200 to 600	0.64 to 0.78
	Polished	200	0.21
Tin	Burnished	20 to 50	0.04 to 0.06
Titanium	Oxidized at 540°C	200	0.40
		500	0.50
		1000	0.60
	Polished	200	0.15
		500	0.20
		1000	0.36
Tungsten		200	0.05
		600 to 1000	0.1 to 0.16
	Filament	3300	0.39
Zinc	Oxidized at 400°C	400	0.11
	Oxidized surface	1000 to 1200	0.50 to 0.60
	Polished	200 to 300	0.04 to 0.05
	Sheet	50	0.20
Zirconium	Zirconium oxide, powder	Normal temperature	0.16 to 0.20
	Zirconium silicate, powder	do.	0.36 to 0.42

Techniques de Surveillance des Machines Tournantes

Deuxième Edition

Mme Mehdiya Ghozlane

Professeure Technologue en Génie Mécanique

Les industrielles s'orientent vers les stratégies de maintenance conditionnelle pour leurs machines que ce soient de tailles moyennes ou petites. Une des raisons de ceci est la baisse sensible du coût des équipements actuels de « Condition Monitoring ».

L'analyse des vibrations est l'une des méthodes les plus utilisées en maintenance prédictive. L'évolution des systèmes d'acquisitions et de traitements des signaux permet de plus en plus de diagnostiquer les défauts mécaniques et de suivre leurs évolutions.

En surveillant l'état des huiles, d'éventuels problèmes peuvent être décelés à un stade précoce et il est alors possible d'intervenir avant qu'elles ne tombent en panne. Elle va encore plus loin, en effet c'est par identification et analyse des causes qu'elle peut remonter à l'origine des pannes.

La thermographie infrarouge est une technique permettant de donner une imagerie sans contact des distributions de température par rayonnement infrarouge des installations industrielles ce qui permet de déceler les anomalies dû au dysfonctionnement et par suite la détection précoce.

Le but essentiel de cet ouvrage est de montrer l'intérêt primordial des techniques de surveillance dans la maintenance des équipements industriels, et peut servir comme étant un support à la fois théorique et pratique indispensable aux ingénieurs et aux techniciens de maintenance industriel soucieux de mettre en place, au sein de leur entreprise, une stratégie de maintenance prédictive, fiable adaptée aux enjeux économiques.