

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT D'ELECTROMECHANIQUE

جامعة باجي مختار – عنابة
كلية علوم المهندسين
قسم الإلكتروميكانيك

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de
DOCTORAT D'ETAT

*Techniques de Maintenance Prédictive pour
l'Amélioration de la disponibilité des
Installations*

Option

ELECTROMECHANIQUE

Par

Abdallah KABOUCHE

Directeur de thèse : Ali HADDOUCHE M.C Université de Annaba

DEVANT LE JURY

Président : Abdelouaheb BENRETEM M.C Université de Annaba

Examineurs : Hamlaoui BOUGHOUAS M.C Université de Constantine

Mohamed BENIDIR M.C Université de Constantine

Mekki ASSAS M.C Université de Batna

Remerciements

Mes remerciements s'adressent en premier lieu à toutes les personnes qui ont permis le bon déroulement de ces travaux de thèse.

Je remercie sincèrement monsieur Ali HADDOUCHE, maître de conférence au département Electromécanique Faculté des sciences de l'ingénieur et directeur du laboratoire des systèmes électromécanique, qui a assuré le suivi de mes travaux en me fournissant le support scientifique et les conseils nécessaires à ma formation durant la préparation de ma thèse.

Je remercie le professeur Menad SIDAHMED Directeur du département mécanique à l'université de technologie de compiégne (France) de m'avoir accueilli dans son laboratoire Heuristique et Diagnostic des Systèmes Complexes (HEUDIASYC).

Je souhaiterais exprimer mes remerciements à Monsieur Abdelouaheb BENRETEM pour avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Merci à Messieurs Hamlaoui BOUGHOUAS , Mekki ASSAS et Mohamed BENIDIR pour leur participation comme examinateurs à mon jury de thèse.

Je souhaite de plus exprimer ma gratitude aux responsables de la centrale électrique de Annaba pour m'avoir complètement ouvert les portes de leur entreprise. Je pense particulièrement à Saidi Mohamed et Haroun Noureddine chef service bureau de méthode ainsi que Ghorabi Nassima et Grairia Mohamed chef structure diagnostic.

Enfin j'accorde une mention spéciale à ma femme, mes enfants Farhou, Soussa et Kacem ainsi que ma famille qui sont une source permanente de motivation et de bonheur.

Résumé : L'évaluation prévisionnelle de la disponibilité de production d'une installation constitue une des préoccupations majeures des industriels dans le domaine de la sûreté de fonctionnement, alors qu'elle n'est encore que peu abordée au sein de la communauté académique

Après avoir développé le contexte et la problématique de cette thèse, nous proposons une démarche globale qui fait appel à deux grands axes de développement. L'aspect technique des équipements et l'aspect organisationnel. Ces deux études sont menées en parallèle et les phases de réorganisation de la maintenance servent de support et de référence pour l'application des stratégies et tactiques de maintenance choisies.

Pour l'aspect technique, l'augmentation des vibrations permet de détecter un défaut, l'analyse des caractéristiques des vibrations de la machine permet d'en identifier la cause. On peut ensuite en déduire avec précision le délai avant qu'il ne devienne critique.

Dans notre travail, nous donnons une méthodologie pour l'application de l'analyse fréquentielle en maintenance prédictive dans le cas d'un turboalternateur.

Pour l'aspect organisationnel, nous proposons une nouvelle structure d'organisation qui doit être le moteur de la maintenance par la flexibilité, la réactivité, et l'adaptabilité à des conjonctures capricieuses et aux situations changeantes en s'appuyant sur les techniques de formation d'apprentissage par la pratique et d'apprentissage par l'usage.

Les développements conceptuels et méthodologiques de cette thèse ont pour but à partir des données du retour d'expérience, élaborer une stratégie d'organisation de la maintenance prédictive afin de formaliser le processus de production adaptée aux exigences et contexte des entreprises.

Abstract: The a priori assessment of production availability of their installations is of a major interest for engineers and managers, when the academic community is still not very familiar with this question.

After expanding upon the contexte and problems developed through this thesis, we propose general guidelines that takes into consideration two main aspects – the technic aspects of equipments and the organisational aspects. These two studies are carried out parallely, and the organisational phases of maintenance serve as support and reference for applying the strategies and tactics of the chosen maintenance policy.

As for technical aspect,if the increase in the vibrations makes it possible to detect a defect, the analysis of the characteristics of vibration of the machine makes it possible to identify the cause of it. One can then deduce with precision the time from it before it does not become critical.

In our work, we give a methodologie of frequentiel analysis application in predictive maintenance, in a cause of turboalternateur.

As for the organisational aspect of maintenance, we propose a new structure of organisation that must be the motor of maintenance through flexibility, reactivity, and adaptability to the capricious interactions and to fluctuating conditions while emphasising on the technical training and practice of regular users.

The conceptual and methodological developments through this thesis, evolving from feedback data, are geared towards elaborating an organisational strategy of predictive maintenance, in order to formalise the production process adapted to the exigencies and contextual frameworking of enterprise.

.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Problématique.....	2
Chapitre 1 Concepts de la maintenance	
1.1 Introduction.....	4
1.2 Evolutions de la fonction maintenance	4
1.3 Définitions générales	6
1.4 Historique et terminologie.....	7
1.5 Les objectifs de la maintenance	9
1.5.1 Le premier objectif se décline en	10
1.5.2 Le second objectif de la maintenance vise à	10
1.6 Maintenance corrective	11
1.7 Avantages et inconvénients de la maintenance corrective.....	11
1.8 Maintenance préventive	12
1.8.1 Opportunités de la maintenance préventive	12
1.8.2 Maintenance préventive systématique	13
1.8.3 Avantages et inconvénients de la maintenance préventive systématique	14
1.9 Maintenance préventive conditionnelle.....	14
1.9.1 Avantages et inconvénients de la maintenance préventive conditionnelle	15
1.9.2 Outils disponibles pour la maintenance conditionnelle industrielle	15
1.10 Les évolutions de la maintenance dans les entreprises	16
1.10.1 Place de la maintenance dans les entreprises.....	17
1.10.2 Evolution des objectifs assignés au service maintenance	18
1.10.3 Evolution de la maintenance curative vers la maintenance prédictive.....	18
1.11 Evolution technique.....	19
1.11.1 Les niveaux de maintenance.....	19
1.11.2 Maintenance de base confiée aux opérateurs de production.....	20
1.11.3 Externalisation de la maintenance.....	21
1.12 Développement des normes et méthodes.....	21
1.12.1 Recherche des polycompétences.....	21
1.12.2 Poids croissant des bureaux.....	21
1.13 Développement de la Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur.....	21
1.14 Le e-maintenance.....	22
1.15 La télémaintenance.....	22
1.16 La maintenance et la sûreté de fonctionnement.....	22
1.17 Le processus de maintenance.....	24
1.18 Politiques de maintenance.....	24
1.18.1 Les politiques de maintenance.....	24
1.18.2 Les indicateurs de performance de la maintenance.....	24
Conclusion	25
1.19 Une priorité à la disponibilité des équipements	25

1.20	La maintenance et ses coûts.....	26
1.20.1	Evaluation des conséquences économiques.....	27
1.20.1.1	Définition et concepts.....	27
1.20.1.2	Coût de la politique de maintenance : Cp.m.....	30
1.20.2	Les coûts de maintenance directs.....	32
1.20.2.1	Analyse des coûts de maintenance.....	32
1.20.2.2	Le coût direct de maintenance (DMC)	33
1.20.2.3	Les coûts de maintenance indirects (IMC)	35
1.20.3	coûts de remise en marche : Cr.m.....	36
1.20.4	Estimation des coûts de maintenance.....	37
1.20.4.1	Description.....	37
1.20.4.2	Coût de maintenance d'une usine.....	37
1.21	Conclusion.....	38

Chapitre 2 Analyse de la disponibilité des installations de production

2.1	Introduction.....	39
2.2	Fiabilité principes et définitions.....	39
2.2.1	Avant propos.....	39
2.2.2	Définition et notations.....	39
2.2.3	Fiabilité.....	39
2.3	Défaillance et taux de défaillance.....	41
2.4	Temps de fonctionnement.....	43
2.4.1	Le MTBF.....	44
2.5	Fiabilité et maintenance préventive.....	44
2.5.1	Temps avant maintenance préventive.....	44
2.5.2	Le MTBUR.....	45
2.5.3	Le MTBR.....	46
2.6	Analyse de fiabilité en exploitation.....	46
2.7	La disponibilité	47
2.7.1	Disponibilité instantanée.....	49
2.7.2	Amélioration de la disponibilité des installations.....	50
2.7.3	Evaluation de la disponibilité.....	51
2.8	Analyse de la disponibilité des installations de production électrique.....	54
2.8.1	Présentation de la centrale thermique d'Annaba	55
2.8.2	Schéma d'un cycle thermique vapeur	56
2.9	Enjeux de la maintenance efficace.....	60
2.10	Conclusion.....	60

Chapitre 3 Maintenance prédictive

3	Introduction.....	63
3.1	Historique	64
3.2	Evolution de la maintenance.....	64
3.2.1	de la maintenance réactive à la maintenance proactive.....	64
3.2.2	Maintenance prédictive.....	67
3.2.2.1	Définition.....	67
3.2.2.2	Avantages par rapport à la maintenance corrective.....	68
3.2.2.3	Avantages par rapport à la maintenance préventive systématique.....	68
3.2.2.4	Limites de la maintenance prédictive	69

3.3	Techniques de surveillance utilisées en maintenance prédictive	69
3.3.1	Introduction	69
3.3.2	la thermographie infrarouge	70
3.3.2.1	Définitions	70
3.3.2.2	Principe de base.....	70
3.3.2.3	Généralités sur l'infrarouge.....	70
3.3.2.4	Différents instruments de mesure.....	71
3.3.2.5	exemples de défauts détectés par caméra infrarouge.....	72
3.3.3	Surveillance et analyse des huiles industrielles	73
3.3.3.1	Généralité	73
3.3.3.2	Les différentes méthodes d'analyse des huiles.....	74
3.3.4	Contextes économiques.....	77
3.3.5	Conclusion	77
3.3.6	L'analyse acoustique	77
3.3.7	L'analyse vibratoire.....	78
3.4	Choix des méthodes de surveillance	78
3.4.1	Choix selon le type de défaut	78
3.4.2	Choix selon le type d'installation	81
3.5	Exploitation de la complémentarité des méthodes	81
3.6	Perspectives de la maintenance prédictive au sein d'une centrale électrique.	82
3.6.1	Problématique de la maintenance	82
3.6.2	Application de la maintenance prédictive à la SONELGAZ	83
3.6.3	Rénovation des systèmes de surveillance existants	85
3.6.4	Mise à jour des programmes de maintenance	86
3.6.5	L'organisation de l'expertise	86
3.7	Questions liées au choix de la maintenance prédictive	87
3.7.1	Apports fonctionnels de la surveillance	87
3.7.2	Prévention des risques majeurs	87
3.7.3	Optimisation de la maintenance	88
3.7.4	Aide à l'exploitation des matériels	88
3.8	Apports organisationnels de la surveillance	89
3.9	Impacts de la maintenance prédictive sur les métiers.....	89
3.10	Conclusion et perspectives.....	90

Chapitre 4 Analyse vibratoire

4.1	Introduction	92
4.2	Définition d'une vibration	92
4.3	Objectifs de l'analyse vibratoire.....	93
4.4	Principe de l'analyse.....	93
4.5	Théorie de vibration	95
4.5.1	Vibration harmonique.....	95
4.5.2	Vibration périodique non harmonique.....	98
4.5.3	Notion de phase.....	98
4.5.4	Fréquence.....	99
4.5.4.1	Définition.....	99
4.5.4.2	Relation entre fréquence et période.....	99

4.5.4.3 Unités.....	99
4.5.5 Amplitudes.....	100
4.5.5.1 Définition.....	100
4.5.5.2 Grandeurs associées à l'amplitude d'une vibration.....	101
4.5.5.3 Niveau global de vibration.....	101
4.5.6 Indicateurs de vibration de type impulsionnel.....	102
4.5.6.1 Facteur de crête	102
4.5.6.2 Distribution de l'amplitude : kurtosis	103
4.5.6.3 Mesure dans la plage de résonance du capteur	104
4.5.7 Modulation et battement	104
4.5.7.1 Modulation de fréquence	105
4.5.7.2 Modulation d'amplitude	105
4.5.8 Configuration des mesures	108
4.5.8.1 Plage de fréquence et résolution d'un spectre	108
4.5.9 Durée de mesure pour un spectre.....	110
4.5.10 Les seuils d'alarme	115
4.5.11 Instrumentation	117
4.5.11.1 Les capteurs de vibration	117
4.5.11.2 Réponse en fréquence.....	123
4.5.11.3 Position de montage	124
4.5.11.4 Montage de l'accéléromètre	125
4.6 Les outils de l'analyse vibratoire	126
4.6.1 La chaîne d'acquisition	126
4.6.2 Le matériel d'analyse	127
4.6.2.1 Analyseur numérique	127
4.6.2.2 Collecteur de données	127
4.6.3 Capteur : accéléromètre Piézo-électrique	128
4.6.4 Choix des points de mesures	129
4.6.5 Mode de fixation des capteurs	130
4.7 Mise en oeuvre de la surveillance	131
4.7.1 Introduction	131
4.7.2 Stratégie de surveillance permanente (sécurité)	131
4.7.3 Emplacements des capteurs	132
4.7.4 Configuration de la surveillance	133
4.8 Stratégie de surveillance périodique (détection précoce)	133
4.8.1 Introduction.....	133
4.8.2 Paramétrage de l'indicateur scalaire : « kurtosis	135
4.8.3 Paramétrage d'un indicateur spectral (spectre PBC)	136
4.9 Diagnostic	137
4.10 Mise en oeuvre	137
4.10.1 Itinéraire appliqué	138
4.11 Application de surveillance par analyse fréquentiel dans le cas des turbo pompes.....	139
4.11.1 Interprétation des courbes d'évolutions	139
4.11.2 Conclusion	141
4.11.3 Le système d'acquisition.....	141
4.11.4 Signatures initiales	142
4.11.5 Constitution du dossier «Surveillance»	144
4.11.6 Définition de la surveillance.....	144
4.11.7 Rapport technique d'analyse	145
4.11.8 Interventions réalisées suite aux diagnostics.....	146

4.11.9 contrôle informatique	146
4.12 Conclusion	148

Chapitre 5 Diagnostic des systèmes

5.1 Généralités	150
5.2 Définitions et concepts généraux	150
5.3 Objectifs du diagnostic	153
5.4 Méthodes de diagnostic	154
5.4.1 Méthodes à base de modèles	155
5.4.1.1 Modèles causaux qualitatifs	155
5.4.1.2 Les méthodes quantitatives	157
5.4.2 Méthodes à partir de données historiques	158
5.4.2.1 Méthodes qualitatives	158
5.4.2.2 Méthodes quantitatives	160
5.5 Réduction des données	162
5.6 Extraction des caractéristiques	162
5.7 Détermination des variations	163
5.8 Détermination de la présence d'un défaut	164
5.9 Classification du défaut	164
5.10 Mise en place du système d'aide au diagnostic	165
5.10.1 Introduction	165
5.10.2 La surveillance des turboalternateurs à la centrale	165
5.10.3 Caractéristiques principales de PSAD	166
5.10.4 Architecture matérielle	167
5.10.5 Les systèmes de surveillance	167
5.10.6 Architecture logicielle	168
5.10.6.1 Traitements temps réel:	168
5.10.6.2 Traitements temps différé	169
5.11 Les jonctions de diagnostic dans PSAD	170
5.12 Retour d'expérience	171
5.12.1 Documents	171
5.12.2 Mise en place d'indicateurs	172
5.12.3 Objectifs du retour d'expérience dans le PSAD	172
5.13 Aide au diagnostic en ligne	173
5.14 Bilan de comportement des machines	173
5.15 Suivi des performances thermohydrauliques	174
5.16 Suivi des températures palier	174
5.17 Conclusion	175
Conclusion générale	176

Figures

- Figure 1.1: Evolution des différents type de maintenance durant les 40 années passées
- Figure 1.2 : Priorités à moyens terme de la maintenance
- Figure 1.3 : Décomposition des coûts de maintenance
- Figure 1.4 : Coût idéal de maintenance préventive
- Figure 1.5 : L'indicateur de coûts directs de maintenance
- Figure 2.1 : Loi exponentielle d'apparition des défaillances
- Figure 2.2 : Densité de probabilité de défaillance
- Figure 2.3 : Définition des concepts de fiabilité
- Figure 2.4 : Taux de défaillance, Courbe en baignoire
- Figure 2.5 : Temps de fonctionnement
- Figure 2.6 : temps entre deux défaillances
- Figure 2.7 : le MTBUR [CORA75]
- Figure 2.8 : Synopsis d'analyse de fiabilité en exploitation
- Figure 2.9 : Variation de la disponibilité dans le temps
- Figure 2.10 : Influence de la maintenance sur la stabilité de la disponibilité
- Figure 2.11 : Les différents types d'indisponibilité
- Figure 2.12 : Disponibilité
- Figure 2.13 : Répartition des MTBF et MTTR
- Figure 2.14 : Relations entre fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité
- Figure 2.15 : Schéma de principe de la centrale
- Figure 2.16 : Schéma du cycle vapeur de la centrale thermique
- Figure 2.17 : Disponibilité de la centrale durant les sept dernières années
- Figure 2.18 : Production de la centrale ,GWH
- Figure 2.19 : Production annuelle d'énergie par secteur
- Figure 2.20 : Indisponibilité de la centrale
- Figure 2.21 : Quantité d'intervention pour maintenance
- Figure 2.22 : Objectifs d'implantation d'un programme de maintenance prédictive
- Figure 3.1: Evolution historique de la maintenance
- Figure 3.2 : Exemple de défaut sur une installation électrique
- Figure 3.3 : Défaut d'engrenage Avant et après correction
- Figure 3.4 : Défaut de roulement
- Figure 3.5 : Détermination de la pollution gravimétrique pour le contrôle de la contamination des huiles hydraulique
- Figure 3.6 : Principe du ferrographe à lecture directe
- Figure 4.1 : Vibration harmonique
- Figure 4.2 : Spectre d'un signal temporel
- Figure 4.3 : Phase du signal
- Figure 4.4 : Vibration mécanique non harmonique
- Figure 4.5 : représentation graphique d'une phase
- Figure 4.6 : Représentation graphique des différents type d'amplitudes
- Figure 4.7 : Choix des grandeurs physiques à mesurer
- Figure 4.8 : Exemple d'utilisation d'un niveau global
- Figure 4.9 : Facteur de crête
- Figure 4.10 : Variation périodique de l'amplitude
- Figure 4.11 : Somme de deux vibration
- Figure 4.12 : Amplitude de deux fréquences proche
- Figure 4.13 : Possibilité de modulation avec déphasage
- Figure 4.14 : Signal spectral de la fonction modulée

Figure 4.15 : Différents type de capteur de vibration
Figure 4.16 : Vue en coupe des accéléromètres
Figure 4.17 : Limites de choix des accéléromètres
Figure 4.18 : Exemple d'accéléromètre à électronique intégrée
Figure 4.19 : Position de montage des capteurs
Figure 4.20 : Méthodes de montage des accéléromètres
Figure 4.21 : Acquisition et visualisation du signal
Figure 4.22 : Analyseur numérique
Figure 4.23 : Collecteur de données Bruel & Kjaer –Schenck CMS
Figure 4.24 : Exemple de fixation des accéléromètres
Figure 4.25 : Les trois directions de mesure pour chaque palier
Figure 4.26 : Les points de mesures d'une structure du turbo-alternateur
Figure 4-27: Les points de mesures d'une structure de turbo-pompe
Figure 4.28 : Modes de fixation utilisables selon les plages de fréquences
Figure 4.29 : photo du module "Vibrocontrol"
Figure 4.30 : Vue d'ensemble de l'instrumentation nécessaire à la surveillance vibratoire
Figure 4.31 (a,b,c,d) : Position des accéléromètres dédiés à la surveillance permanente sur les paliers du sélecteur
Figure 4.32 : Mise en évidence de l'effet de masque du à la grande énergie des résonances basses fréquences
Figure 4.33 : Evolutions relatives de la valeur efficace et du Kurtosis
Figure 4.34 : Exemple du spectre PBC
Figure 4.35 : Exemple d'itinéraire pour les relevés périodiques (sur la gauche) et la représentation schématique de l'emplacement des points de mesure (à droite)
Figure 4.36 : Courbes des tendances de l'amplitude
Figure 4.37 : Spectre en fréquence des paliers
Figure 4.38 : Le rack du groupe électronique
Figure 4.39 : Signature vibratoire initiale relevée sur le palier "Ouest" dans l'axe vertical avec une vitesse de rotation de 3000 tr/min
Figure 4.40 : Spectre PBC 6% sur le palier Est dans l'axe vertical à une vitesse de rotation de 3000 tr/min.
Figure 4.41 : Vue générale du poste de contrôle
Figure 4.42 : Exemple d'analyse de tendance
Figure 4.43 : Exemple de détection des défauts en utilisant la comparaison de spectre PBC
Figure 5. 1 : Introduction d'outils de surveillance, de diagnostic et d'aide à la décision au niveau de la supervision
Figure 5.2 : Classification des méthodes de diagnostic [DASH, 00]
Figure 5.3 : Étapes du processus de détection de défauts
Figure 5.4 : Extraction des caractéristiques du procédé
Figure 5.5 : Groupe motopompe primaire: position des capteurs de vibration.
Figure 5.6 : Groupe turboalternateur : position des capteurs de vibration.
Figure 5.7 : L'architecture matériel de PSAD
Figure 5.8 : Exemple de tracés et gestion de la feuille de travail
Figure 5.9 : Sélection des descripteurs du GTA
Figure 5.10: Exemple de suivi TRS

Tableaux

Tableau 1-1 : Diagramme des différents concepts de maintenance

Tableau 1-2 : les ressources nécessaires pour chaque niveau de maintenance

Tableau 1-3 : Les paramètres de la sûreté de fonctionnement

Tableau 3.1 : Eléments moteurs d'une entreprise

Tableau 3.2 : Principales méthodes de détection

Tableau 3.3 : Choix des méthodes de détection des défauts

Tableau 3.4 : Techniques de surveillance pour différents composants de la centrale

Tableau 4.1 : Facteurs de crête pour différente nature de vibration

Tableau 4.2 : Valeur du kurtosis pour différente nature de vibration

Tableau 4.3 : Moyens et objectifs tracer en fonction des méthodes d'analyse

Tableau 4.4 : Précision de mesure en fonction de la vitesse

Tableau 4.5 : seuils d'alarme en basse et haute fréquence

Tableau 4.6 : Norme ISO 2372 / VDI 2056 - Mesure de 10 à 1000 Hz

Tableau 4.7 : Seuil d'alerte et d'alarme en % de la norme

Tableau 4.8 : seuils d'alerte et d'alarme en valeur absolu

Tableau 4.9 : Seuils d'alarme en accélération pour les paramètres hautes fréquences

Tableau 4.10 : Principales caractéristiques des capteurs

Tableau 4.11 : Fréquence de résonance pour différents type de montage

Tableau 4.12 : Fiche définition machine

Tableau 4.13 : Exemple de fiche de suivi des interventions

Introduction générale

L'évolution de l'appareil productif, avec des machines de plus en plus complexes et automatisées, a conduit à une nouvelle perception des enjeux rattachés à la fonction maintenance. Cette fonction a beaucoup évolué et continue d'évoluer comme le montre des analyses réalisées sur les trois dernières années et qui concernent l'évolution des budgets, des effectifs et des marchés de la maintenance d'une part, et à son comportement dans les différents types de secteurs d'activités d'autre part. Ces analyses montrent l'intérêt majeur de la maintenance et de la maintenance prédictive en particulier dans un contexte industriel.

Parmi les outils de la maintenance prédictive, l'analyse des vibrations est celui qui connaît aujourd'hui un des développements les plus importants du fait de l'évolution des techniques dans les domaines de l'informatique et du traitement du signal. La finalité de ce type de surveillance est destinée à assurer la sécurité de l'installation en évitant des dégradations importantes par le déclenchement d'alarmes, lorsque le niveau des vibrations atteint des valeurs jugées excessives pour le bon fonctionnement ou l'intégrité de cette dernière. Il existe différentes techniques d'investigation utilisées dans le domaine du suivi des machines tournantes ; ces techniques sont décrites dans le troisième chapitre.

Cependant, l'objectif du personnel de maintenance est double ; détecter une défaillance d'une part, et prévoir le temps résiduel de fonctionnement après détection d'autre part. La notion de détection a pour objectif de mettre en évidence l'existence d'une anomalie à un stade précoce. La notion de temps résiduel de fonctionnement est quant à elle basée sur la connaissance de l'évolution de la gravité des défaillances.

Le diagnostic basé sur les mesures vibratoires permet de connaître l'état de fonctionnement des composants mécaniques. La qualité et la fiabilité d'une mesure vibratoire dépendent d'une part du matériel utilisé et de l'expérience des techniciens de maintenance d'autre part.

L'objectif de ce travail consiste à obtenir un équilibre correct entre les interactions des systèmes de production et les diverses options stratégiques des systèmes de maintenance : maintenances prédictive, préventive et corrective.

Problématique

L'électricité est un bien de consommation qui est devenu indispensable au bien-être de la population et au développement économique de toute société. A ce titre, il est vital pour un pays qu'un accès à l'électricité soit assuré et que la continuité de sa fourniture soit garantie. Une adéquation entre les capacités de production, de transport et de distribution disponibles à moyen et long terme d'une part et l'évolution de la demande future d'électricité d'autre part est indispensable pour y parvenir.

L'évolution de la consommation sur la période 1995 – 2004 a évolué avec un taux de croissance annuel moyen de 5.1% (figure 1)

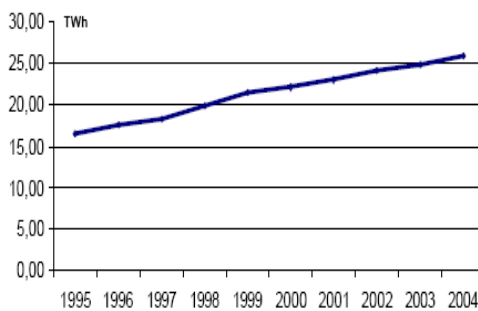


Figure1: Consommation Electricité 1995–2004

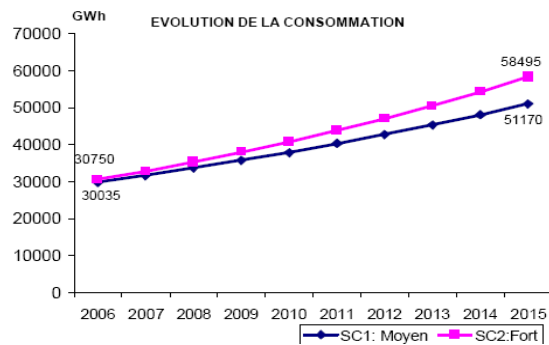


Figure3 : Evolution de la consommation 06-15

En tenant compte de l'ensemble des hypothèses, les prévisions de la consommation, de la production et de la puissance maximale appelée sur la période 2006 - 2015, sont données dans la figures3 où il ressort:

- Dans le cas du scénario moyen, une évolution de 5.5% en énergie et de 4.8% en puissance;
- Pour le scénario fort, un taux de croissance de 6.7% pour l'énergie et de 6.1% pour la puissance.

Cela signifie la mise en place de nouveaux moyens de production.

Tableau1: Les nouveaux moyens de production 2005-2008

Lieu d'implantation	Puissance (MW)	Date de mise en service
Arzew	3 X 112	2005
Skikda	2 X 412	2006
Berrouaghia	2 X 242	2006
Hadjret Ennous	3 X 400	2008

Cela montre le rôle stratégique que la fonction maintenance occupe au sein des entreprises

de production électrique. On ne parle plus vraiment d'une simple maintenance des équipements mais plutôt d'une gestion de ces ressources au même titre que l'on gère la production, la qualité et le personnel.

Une gestion efficace des équipements pourra ainsi générer des retombées directes à tous les niveaux dans l'entreprise incluant la sécurité et la qualité du milieu de travail.

Cela nous mène à chercher et à analyser les facteurs qui contribuent à l'amélioration de la disponibilité de ces équipements.

Le tableau ci-dessous nous montre la disponibilité et l'indisponibilité de la centrale électrique de Annaba que nous avons prise comme échantillon durant les années 2001 – 2005.

Disponibilité et Indisponibilité de la centrale en %	Années				
	2001	2002	2003	2004	2005
Disponibilité totale	20,84	43,15	47,21	59,93	46,98
Indisponibilité pour entretien programmé	35,25	27,83	27,36	8,87	18,82
Indisponibilité à cause des arrêts fortuit	43,91	29,01	25,43	31,20	47,29

Nous pouvons constater que la disponibilité totale n'a jamais dépassé les 60% des capacités installées. Nous pouvons remarquer aussi que l'indisponibilité due aux arrêts imprévus est très importante, ce qui justifie le coût de maintenance (voir tableau ci-dessous)

Tableau : Coûts directs de maintenance durant l'année 2005 (en DA)

Type de maintenance	Coût ressources	Coût pièces	Total
Conditionnel	132 843,51	3 598 173,62	3 731 017,13
Systématique	1 627 773,55	500 024 777,90	501 652 551,45
Curatif	3 045 450,08	8 373 045,81	11 418 495,89
Travaux neufs	20 325,53	426 678,72	447 004,25
Total général	4 826 392,67	512 422 676,05	517 249 068,72

Comme dans la production de l'énergie électrique les groupes turboalternateurs représentent le noyau de la centrale. N'importe quel arrêt fortuit influe directement sur la production et perturbe les responsables de l'entreprise. C'est pour cela qu'il faut pour

l'essentiel comprendre, les exploitants de ces centrales qui souhaitent, dans des délais raisonnables, pouvoir connaître si tels ou tels organes résistent aux conditions de fonctionnement auxquelles ils sont soumis.

Notre travail s'est alors orienté dans trois directions afin d'optimiser le système de maintenance, la politique de maintenance, les techniques de surveillance et l'analyse des coûts.

Dans le premier chapitre, nous rappellerons certains concepts de maintenance, non seulement pour introduire certaines définitions, mais également pour mettre en évidence l'ampleur de l'effort nécessaire pour mettre en place un système de maintenance. Pour mieux saisir cette ampleur, nous passerons en revue les principales fonctions qui doivent être assurées par un service de maintenance et les interactions entre la fonction maintenance et les autres fonctions de l'entreprise.

Au deuxième paragraphe, nous introduirons la démarche et l'évaluation des conséquences économique de la maintenance. Nous proposerons également une démarche de décomposition des coûts de maintenance et leurs rôles dans l'analyse de la sûreté de fonctionnement. A partir de données disponibles, génère la loi de dégradation d'un équipement. Ce paragraphe vise essentiellement à démontrer que la durée de vie d'un équipement est une variable aléatoire et que les caractéristiques de ce dernier se dégradent avec l'usage.

Dans le chapitre deux, nous rappelons en quoi consiste la notion de disponibilité de production et montrer qu'elle constitue un indicateur quantitatif pertinent qui révèle la performance globale de tout système de production.. Nous allons évoquer également les différents problèmes relatifs à l'implantation d'un système de maintenance dans une centrale électrique. Ces problèmes se résument généralement à la pénurie de ressources humaines compétentes, la carence de ressources matérielles nécessaires et la déficience d'un système d'information capable de nous indiquer qui fait quoi, quand et comment.

Dans le troisième chapitre nous allons évoquer l'importance de la maintenance prédictive, les conditions de mise en place, ainsi que les différentes techniques de maintenance prédictive.

La mise en place d'un système de suivi qualité rend possible la détection de l'apparition des défaillances suffisamment tôt pour éliminer totalement la génération de rebuts.

La maintenance prédictive s'appuie sur l'idée qu'un contrôle régulier des conditions mécaniques et du rendement des systèmes industriels permet de maximiser l'intervalle entre chaque réparation. Cette nouvelle méthode minimise également le nombre et le coût

des arrêts de production imputables aux pannes ; elle améliore par conséquent de disponibilité globale des chaînes de production. Enfin, elle permet de réduire considérablement les coûts de maintenance.

Nous citons dans ce chapitre les techniques qui peuvent être, utilisées dans un programme de maintenance prédictive. Un programme de maintenance prédictive complet doit faire appel aux techniques de contrôle vibratoire, de la thermographie, la tribologie et autres. Toutes ces techniques ont pour but de rendre possible la détection de l'apparition des défaillances suffisamment tôt pour éliminer totalement la génération de rebuts.

Le quatrième chapitre est consacré au contrôle des machines tournantes par analyse vibratoire qui est couramment utilisé notamment pour la surveillance des composants fragiles ou stratégiques des turboalternateurs. La démarche classiquement suivie en diagnostic par analyse vibratoire, qui permet, pas à pas, d'isoler le composant mécanique défaillant, puis de caractériser la nature du défaut. Cette démarche permet le remplacement de l'élément défaillant sans avoir à recourir au démontage complet de l'installation, d'où un gain de temps appréciable. Rappelons que son succès ne tient qu'à la seule connaissance de la cinématique du système et bien sûr, à l'emploi d'outils spécifiques de traitement du signal ainsi que des techniques adéquates d'acquisition. Nous restons convaincus qu'une large classe de systèmes peut ainsi être contrôlé ou diagnostiqué de cette façon, et ceci sans coûts excessifs.

Pour élaborer un diagnostic à partir des signaux vibratoires, les méthodes classiques de traitement du signal telles que l'analyse spectrale et l'analyse cepstrale sont particulièrement adaptées.

Enfin, le cinquième chapitre montre comment peut-t-on développé la maintenance prédictive avec de nouvelles solution. Dans l'approche classique de la maintenance prédictive un expert intervient de temps en temps sur le site de production pour collecter les données fournies par les capteurs installés sur un équipement, après quoi il analyse ces données et émet un jugement. C'est un processus long, coûteux et non automatique. Une autre forme de maintenance prédictive est également pratiquée par les entreprises:

la maintenance "continue" où l'outil de collecte de données est installé sur un équipement critique chez l'utilisateur pour l'acquisition automatique des information. Ces données sont ensuite transmises à un PC chez un expert qui réalise leur analyse et émet un verdict. La collecte est dans ce cas automatique mais pas l'analyse qui fait toujours appel à un expert.

Cela nous mène à présenté les différents outils de diagnostic et proposé un système de surveillance on line appelé poste de surveillance et d'aide au diagnostic (PSAD).

CHAPITRE I

CONCEPTS DE LA MAINTENANCE

1.1 Introduction

Au fil du développement de la concurrence et de la course à la compétitivité, qui entraîne recherche de la qualité totale et surtout réduction des coûts, au fur et à mesure de la complexification et de l'automatisation des processus de production, la maintenance est devenue une des fonctions stratégiques de l'entreprise. Loin d'être aujourd'hui stabilisée, elle évolue au gré de l'introduction de nouvelles méthodes de gestion, du développement technologique des outils de production, en particulier dans les domaines de la mesure et du contrôle de fonctionnement, de la systématisation progressive de l'usage des normes et des procédures... L'ensemble de ces facteurs modifie non seulement les modes d'organisation de la fonction maintenance mais aussi les activités des techniciens et ouvriers qui opèrent dans ce champ.

1.2 Evolutions de la fonction maintenance :

Dans l'entreprise, la fonction « maintenance » consiste de moins en moins souvent à remettre en état l'outil de travail mais de plus en plus fréquemment à anticiper ses dysfonctionnements.

L'arrêt ou le fonctionnement anormal de l'outil de production, et le non-respect des délais qui s'en suit, engendrent en effet des coûts que les entreprises ne sont plus en état de supporter. Elles ne peuvent plus attendre que la panne se produise pour y remédier mais doivent désormais s'organiser pour procéder aux diverses opérations qui permettent de l'éviter. On est ainsi passé d'une « maintenance curative » à une « maintenance préventive », qui se traduit par la définition de plans d'actions et d'interventions sur l'équipement, par le remplacement de certaines pièces en voie de dégradation afin d'en limiter l'usure, le graissage ou le nettoyage régulier de certains ensembles.

Ces actions préventives étaient dans un premier temps effectuées de façon systématique selon des calendriers prédéfinis. Elles permettaient effectivement d'anticiper les pannes, mais au prix d'un alourdissement important des coûts de maintenance. Grâce à l'évolution des technologies de diagnostic et de contrôle, en particulier des capteurs, une nouvelle maintenance se développe aujourd'hui. Elle utilise des techniques de prévision des pannes

comme, par exemple, l'analyse des vibrations ou des huiles. Ce stade ultime de la maintenance, dite « prédictive » ou « préventive conditionnelle », permet de remplacer des pièces juste avant leur rupture. Le passage de la maintenance curative à la maintenance préventive conditionnelle n'est cependant pas systématique. Il vise moins à minimiser les coûts de maintenance qu'à les optimiser en fonction des objectifs de production. Il peut ainsi être économiquement rentable d'appliquer une maintenance préventive systématique à un processus de production particulier, par exemple pour un produit phare à forte marge bénéficiaire, alors que la maintenance curative peut s'avérer la seule « économiquement acceptable » pour un autre produit ou équipement, sur lequel on a l'expérience et l'habitude de réparer des pannes.

Les entreprises opèrent donc des choix parmi les différents types de maintenance en fonction de multiples éléments techniques, économiques, de facteurs internes ou externes : La fréquence des défaillances cycliques ou aléatoires des équipements, les aptitudes et compétences du personnel de maintenance ou des sous-traitants, les politiques et modes d'organisation du travail, la position concurrentielle sur le marché, les produits...

Le développement de la maintenance préventive tend à favoriser une deuxième évolution : les activités de maintenance les plus simples (de premier voire de second niveau selon les normes AFNOR) sont transférées aux opérateurs de production, ce qui devrait entraîner une diminution des effectifs d'agents de maintenance. Cette évolution n'est toutefois pas systématique. Divers facteurs peuvent en effet parfois s'y opposer : tout d'abord des facteurs d'ordre technique, tels la coexistence dans les équipements de plusieurs générations de machines et donc de technologies différentes, l'éloignement physique de l'opérateur par rapport à son outil de production, son impossibilité d'accéder à cet outil pour des raisons de sécurité... ; des facteurs organisationnels également, dans le cas où l'intervention d'un service de maintenance décentralisé s'avère plus efficace ou plus rapide ; enfin, des facteurs humains, lorsque par exemple les opérateurs de production ne sont pas suffisamment formés ou motivés, voire ne sont pas habilités, pour effectuer certaines activités de maintenance.

Troisième évolution majeure : la part des activités de maintenance confiée à des entreprises extérieures spécialisées augmente. Plusieurs facteurs expliquent ce développement de la sous-traitance. Réalisée par des spécialistes, elle est sur le plan technique un gage de qualité et d'efficacité. D'un point de vue organisationnel, les entreprises tendent actuellement à se recentrer sur leur fonction principale, et à déléguer ce qui ne relève pas de leur métier. Enfin, l'externalisation minimise les coûts de la maintenance : l'entreprise

paye au « service » et n'a donc pas à supporter le coût lié à la présence permanente d'un service maintenance très important. Mais la sous-traitance de la maintenance ne va pas nécessairement continuer à se développer. Elle a investi jusque-là des segments de production périphériques au coeur du métier des entreprises. Or elle ne peut aller au-delà de ce stade sans risquer de gravement les fragiliser. Du fait de l'évolution constante des technologies, les entreprises perdraient alors des champs de compétences, de savoirs. Elles manqueraient alors de recul, de visibilité, pour évaluer la valeur des interventions de maintenance réalisées et deviendraient incapable de juger de la qualité des interventions, et surtout de la pertinence des coûts facturés.

Dernière grande évolution en partie liée au développement de la sous-traitance : la généralisation des normes et méthodes.

Les exigences des entreprises donneuses d'ordres se traduisent par la nécessité pour les prestataires de services d'être détenteurs de différentes certifications (une norme ISO, par exemple), de différentes habilitations. Plus généralement, les entreprises sont engagées dans des politiques de qualité totale, et les activités de maintenance se doivent d'appliquer ces politiques. Or la certification apparaît parfois contraignante. Le problème n'est pas tant posé par les normes en elles-mêmes que par les méthodologies qui en sont déduites, très exigeantes notamment sur la formalisation des procédures d'intervention. En effet, si une entreprise possède déjà une organisation et des méthodes de gestion cohérentes, la démarche de certification se limitera à une simple formalisation des procédures déjà en place. A contrario, si l'entreprise a peu, voire pas, de règles de gestion de la maintenance, la démarche de certification risque de provoquer d'importants bouleversements, en particulier dans le contenu des tâches.

1.3 Définitions générales :

Le dictionnaire *Le Robert* [ROBE95] donne de la maintenance la définition suivante : "Action de maintenir, tech. Ensemble des opérations d'entretien destiné à accroître la fiabilité ou pallier des défaillances".

Ne pouvant nous contenter d'une description aussi peu précise, nous pouvons nous référer à la définition normative [AFN01] : "Ensemble de toutes les 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".

Le management de la maintenance concerne toutes les activités des instances de direction qui d'une part déterminent les objectifs, la stratégie et les responsabilités concernant la

maintenance, et d'autre part les mettent en application par des moyens tels que la planification, la maîtrise et le contrôle de la maintenance, l'amélioration des méthodes dans l'entreprise (y compris dans les aspects économiques).

1.4 Historique et terminologie

Le terme "maintenance" dans son histoire comme illustre [MON 00] est forgé sur les racines latines *manus* et *tenere*, est apparu dans la langue française au XII^e siècle. L'étymologiste Wace a trouvé la forme *maintenor* (celui qui soutient), utilisée en 1169. Le terme est réapparu à l'époque moderne dans le vocabulaire des militaires "maintien dans les unités de combat, de l'effectif et du matériel à un niveau constant". Définition intéressante car l'industrie l'a reprise à son compte en l'adaptant aux unités de production affectée à un combat économique.

Vers les années 1980 virent les entreprises obligées de s'adapter à des marchés plus fluctuants et élargis. La vie des entreprises est ainsi caractérisée par des mutations profondes:

Technologiques, économiques et sociales. Ces mutations suppriment certains types d'emplois, mais créent également des besoins nouveaux qu'il faut identifier, puis satisfaire en terme d'organisation et de gestion.

Il en est ainsi pour la fonction maintenance, fonction qui a émergé dans les années 1970 à 1980 [MON 87] comme réponse à un besoin nouveau: celui de maîtriser l'organisation et la gestion des équipements de production dans les entreprises qui est capricieux et changeant. La maintenance devient un gisement d'enseignement sur la productivité, la qualité et la sécurité. Il faut donc savoir d'où elle vient (hier, nous subissons la dictature des équipements de production appelé en d'autres termes entretien) là où nous sommes (aujourd'hui, nous cherchons à maintenir) pour orienter notre avenir. Demain nous devons acquérir la pleine maîtrise de nos systèmes de production.

Pour se faire une vision transversale axée sur l'organisation et les méthodes d'analyse des données qui en découlent devient une nécessité.

La concurrence effrénée et la course à la compétitivité incitent l'entreprise à rechercher la qualité totale et surtout la réduction des coûts. La maintenance est ainsi devenue l'une des fonctions stratégiques de l'entreprise. Elle vise donc moins à remettre en état l'outil de travail qu'à anticiper ses dysfonctionnements. L'arrêt ou le fonctionnement anormal de l'outil de production, et le non-respect des délais qui s'en suit, engendrent des surcoûts que

les entreprises ne sont plus en état de supporter. L'entreprise ne doit plus subir les événements, elle doit les prévoir et analyser leurs effets sur le long terme. Autrefois curative, **la maintenance** devient **préventive** et contribue à **améliorer la fiabilité des équipements et la qualité des produits**. Cette maintenance préventive se traduit par la définition de plans d'actions et d'interventions sur l'équipement, par le remplacement de certaines pièces en voie de dégradation afin d'en limiter l'usure, par le graissage ou le nettoyage régulier de certains ensembles.

Ces actions préventives étaient dans un premier temps effectuées de façon **systematique** selon des calendriers prédéfinis. Elles permettaient d'anticiper les pannes, mais au prix d'un alourdissement importants des coûts de maintenance. Grâce à l'évolution des méthodes de diagnostic et de contrôle, une nouvelle maintenance commence à voir le jour. Elle utilise des techniques de prévisions de pannes comme l'analyse des vibrations ou des huiles. Cette maintenance dite "**préventive conditionnelle**" permet de remplacer des pièces juste avant leur rupture. Le choix entre les différents aspects de la maintenance (tableau 1.1) se fait principalement au regard des coûts économiques, mais aussi des aptitudes et compétences du personnel de maintenance, et de la position concurrentielle sur le marché.

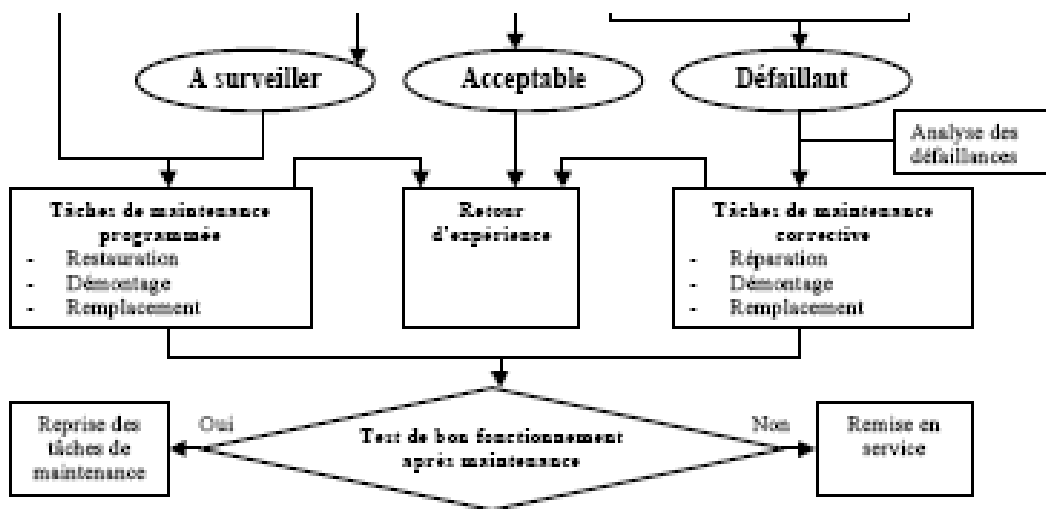
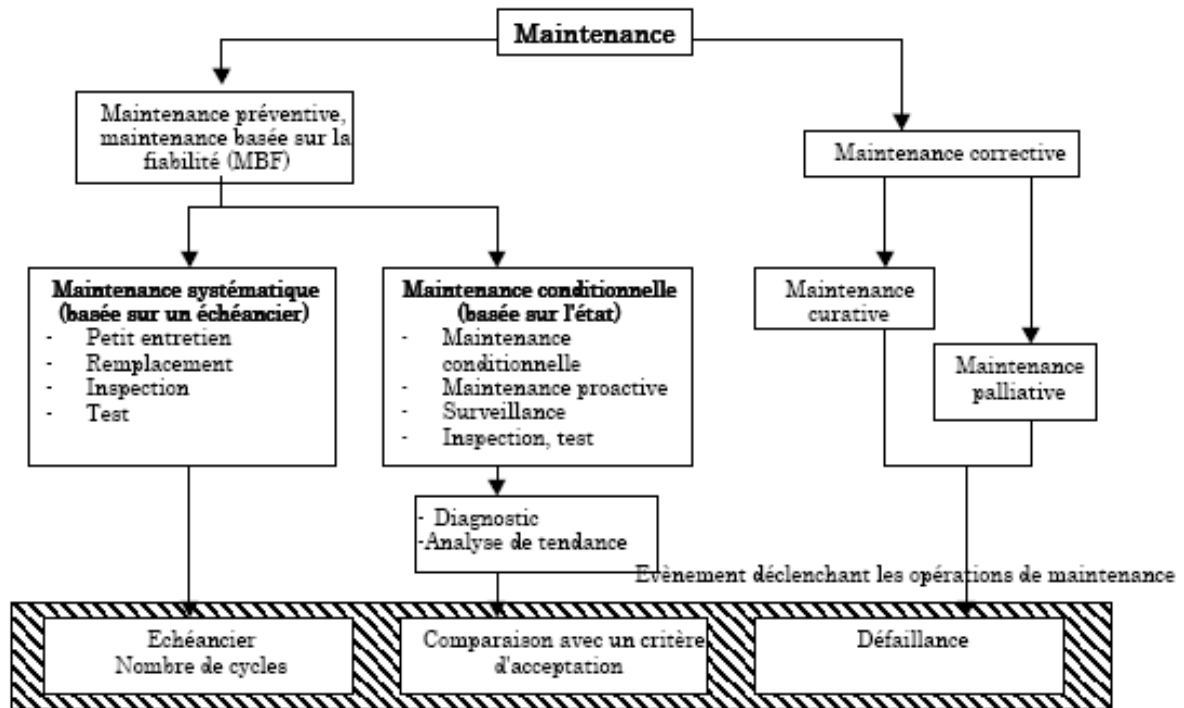


Tableau 1-1 : Diagramme des différents concepts de maintenance

1.5 Les objectifs de la maintenance :

Ces objectifs sont doubles : réduire les dépenses de maintenance et diminuer les capitaux immobilisés.

1.5.1 Le premier objectif se décline en :

- Dépenses du personnel interne : salaires, charges patronales, frais liés à la formation, ... Elles dépendent du métier et du niveau hiérarchique mais ces coûts doivent être majorés de la perte de temps occasionnée par l'opération de maintenance (préparation, coordination, ...). La distinction entre les activités à valeur ajoutée et celles à non-valeur ajoutée permet de définir des axes d'amélioration au cours de réunion avec les différents métiers concernés.

L'analyse de Compression de Temps Cycle (CTC) concerne plus particulièrement les causes de non-valeur ajoutées durant l'intervention: en effet, ces dernières empêchent le redémarrage de la production sans améliorer l'installation. L'organisation des tâches de maintenance en parallèle permet de réduire la durée de l'intervention et la complexité des corps de métiers impose une planification plus efficace pour ce qui ne touche pas à la maintenance curative. Le déroulement d'une journée doit être entièrement prévu. Seules les actions urgentes de réparation peuvent l'affecter. En outre, les activités menées doivent améliorer la fiabilité des installations. Il faut prendre en compte les risques liés au non-respect des programmes de maintenance préventive. Les entreprises recourent à l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité). Cette méthodologie permet d'identifier les modes de défaillances et leurs effets sur le fonctionnement global de l'installation. A savoir :

- Consommation de fournitures industrielles : les pièces de rechanges, ... Il faut :

- définir et prendre les mesures nécessaires pour réduire l'usure de ces pièces (type de fonctionnement, ...)
- vérifier le respect des conditions de stockage ;
- limiter le nombre de fournisseurs ;
- recourir au service achat pour négocier les prix.

1.5.2 Le second objectif de la maintenance vise à :

- Diminuer des stocks de fournitures industrielles:

L'entreprise vise à garder les pièces nécessaires au bon fonctionnement de l'outil industriel, tout en minimisant la valeur ainsi immobiliser.

- Reporter des investissements:

L'entreprise qui souhaite augmenter sa production doit d'abord améliorer sa maintenance et la fiabilité de son outil de production avant d'investir dans de nouvelles installations.

Donnons formellement une définition des différents termes intervenant sur ce schéma :

1.6 Maintenance corrective :

Maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. Pratiquement, c'est fonctionner sans entretien jusqu'à la rupture de la pièce.

Il s'agit d'une "**maintenance effectuée après défaillance**". C'est une politique de maintenance (dépannage ou réparation) qui correspond à une attitude de réaction à des événements plus ou moins aléatoires et qui s'applique après la panne. Ce qui ne veut pas dire obligatoirement que celle-ci n'a pas été « pensée ». C'est un choix politique de l'entreprise qui malgré tout, nécessite la mise en place d'un certain nombre de méthodes qui permettent d'en diminuer les conséquences :

1. Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC), méthode permettant de mettre en évidence de façon prospective un certain nombre d'organes ou de machines critiques pour la sécurité ou la fiabilité d'un système après inventaire des défaillances élémentaires possibles.
2. Installation d'éléments de secours (redondance de matériels)
3. Utilisation de technologies plus fiables
4. Recherche de méthodes de surveillance les mieux adaptées aux points névralgiques (capteurs intégrés...).
5. Utilisation de méthodes de diagnostics de pannes plus rapides (arbre des causes de défaillances, historique des pannes, systèmes experts...)

Dans ce type de maintenance, la panne se traduit pour l'exploitant par une hantise de l'arrêt de production et pour le service entretien par une mobilisation brutale en vue de « faire face ». Les exploitants et l'entretien doivent donc définir, en

collaboration, une stratégie et mettre en place les parades citées précédemment. La maintenance corrective devra s'appliquer automatiquement aux défaillances complètes et soudaines (défaillances catalectiques). Hormis ce cas, ce type de maintenance sera réservé à du matériel peu coûteux, non stratégique pour la production, et dont la panne aurait peu d'influence sur la sécurité. Le taux d'utilisation de cette politique est égal à 50 % des industries générales et à 10 % des industries d'avant-garde.

1.7 Avantages et inconvénients de la maintenance corrective :

Avantages :

- Faible coût de maintenance.

Inconvénients :

- Bris inopportun;
- Coût de réparation important ;
- Peu de sécurité des travailleurs;
- Stockage important des pièces;
- Temps de réparation élevé;
- Perte de production élevée.

1.8 Maintenance préventive :

Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien. C'est une politique qui s'adresse aux éléments provoquant une perte de production ou des coûts d'arrêts imprévisibles, mais importants.

Les matériels visés sont ceux dont le coût des pannes est élevé (20 % des pannes représentant 80 % des coûts.) La mise en pratique nécessite de décomposer les sous-systèmes en éléments maintenable (palier, réducteur, etc...) La périodicité des visites s'établit par l'étude des lois statistiques de la durée de vie.

Des gammes d'entretien sont élaborées de façon à préciser le travail à exécuter et de garder la traçabilité de l'entretien. Un rapport est rédigé mettant en relief les diverses mesures et les observations. Ces rapports d'intervention servent à alimenter une banque de données.

1.8.1 Opportunités de la maintenance préventive :

La mise en place d'une maintenance préventive rend service :

1. au service de sécurité (diminution des avaries catastrophiques);
2. au service de maintenance (meilleure planification des travaux et du personnel, moins d'imprévus, charge de travail régulière);
3. au service de fiabilité (connaissance des matériels, le taux de défaillance se trouve réduit);
4. à la production (diminution des arrêts imprévus, meilleure disponibilité
5. au gestionnaire (action sur les coûts de non-maintenance, mais augmentation des coûts directs de maintenance préventive);
6. au client (moins de pannes);
7. à l'enquêteur (connaissance des avaries);
8. au service de qualité (meilleur service);
9. au service de logistique (stock de rechanges);
10. au service méthodes (meilleure planification de la production).

1.8.2 Maintenance préventive systématique :

Généralement, la maintenance préventive s'adresse aux éléments dont **le coût des pannes est élevé**, mais ne revenant pas trop cher en changement (les meilleurs exemples sont le changement systématique de l'huile, changement de la courroie de synchronisation,...).

En d'autres mots quand les conséquences de la défaillance en coût et pertes sont plus importantes que le coût et pertes causés par les remplacements des composantes du produit; à noter que dans une maintenance planifiée, le remplacement des composantes, se fait dans des échéances inférieures à leurs durée de vie, ce qui peut constituer dans d'autres conditions, une sorte de gaspillage.

Pratiquement, la maintenance préventive s'exécute sans contrôle préalable de l'état du bien et à des **intervalles de temps définis** (révision périodique.) Les opérations peuvent être :

Le remplacement :

- De l'huile des boîtes de vitesse, des réducteurs, des mécanismes en mouvement;
- Des filtres (air, huile, carburant,...);
- Des pièces d'usure normal (plaques de glissière, plaquettes de freins, disques d'embrayage, courroie de transmission,...);
- Des roulements, paliers de rotation;
- Des ressorts et d'autres pièces sujets à un phénomène de fatigue mécanique et électrique.

Le réglage et l'étalonnage :

- Des jeux de glissières ou des cales d'ajustement;
- Des tensions de courroies;
- Des niveaux de pressions hydrauliques et pneumatique.

Le contrôle de l'état général :

- Des divers blocage;
- Des niveaux d'huile;
- Apparence d'usure ou de fissure.

1.8.3 Avantages et inconvénients de la maintenance préventive systématique.**Avantages :**

- Réduction des coûts (30 %) et des durées de maintenance par rapport à l'entretien curatif;
- Bonne planification des opérations et des ressources;
- Contrôle du niveau de stockage des pièces de rechange;
- Généralement, peu de catastrophes;
- Sécurité accrue.

Inconvénients :

- Révisions non nécessaires (l'entretien n'est pas fonction de l'état de la machine, mais plutôt de la durée d'utilisation);
- Remplacement de pièces en bon état;
- Création de défauts lors des remontage (si les procédures ne sont pas claires et contrôlées).

1.9 Maintenance préventive conditionnelle :

C'est un type de maintenance déclenché suite à un symptôme observable permettant de prédire une défaillance prochaine. Il s'agit là d'intervenir juste avant que la panne ne survienne.

La maintenance préventive conditionnelle ou Maintenance prédictive, est conditionnée par un évènement prédéterminé obtenu par l'auto-diagnostic, par des relevées de mesures périodiques ou par des capteurs spécialisés... Le choix entre une maintenance préventive

La maintenance préventive conditionnelle est déterminée par les enjeux de la défaillance. La maintenance préventive conditionnelle s'impose quand le coût et pertes dues au remplacement des composants et le coût et pertes dues à la défaillance sont comparables et de même importance. Ce choix permet de disposer des composants du produit jusqu'à la limite de leur durée de vie, et permet par conséquent d'amortir leur coût avec un profit maximal. La maintenance préventive conditionnelle s'adresse aux pièces des machines **coûtant chers en remplacement et pouvant être surveillées par des méthodes non-destructives** (vibration, huile, température, décharge partielle, etc.)

Pratiquement, il s'agit de vérifier l'état de fonctionnement avant d'effectuer tout travail. Changer l'élément que lorsque celui-ci présente des signes de vieillissement ou d'usure affectant les performances.

1.9.1 Avantages et inconvénients de la maintenance préventive conditionnelle :

Avantages :

- Réduction de coût d'environ 30% et de la durée de réparation par rapport à l'entretien préventif;
- L'accroissement de la durée de vie des pièces par rapport à une politique de changement systématique. Remplacement des pièces défectueuses uniquement;
- La suppression des défauts de jeunesse lors de remise en route après un entretien systématique.

Inconvénient :

- Nécessite une équipe de maintenance formée en analyse vibratoire et en essais non destructifs. Niveau technologique plus élevé.

1.9.2 Outils disponibles pour la maintenance conditionnelle industrielle :

- Mesure de température, thermographie infrarouge (lignage, roulements, paliers);
- Mesures de pression (paliers);
- Analyse d'huile (roulements, paliers, engrenages);
- Ferrographie;
- Mesure de vibration (déséquilibre, lignage, roulements, paliers, engrenages, jeux, etc.)

CONCLUSION

Un meilleur préventif implique moins d'intervention corrective, donc moins d'arrêt intempestif des lignes de production. Cependant, il suppose une organisation adéquate, une planification précise et la connaissance des défaillances possibles des installations. Chaque intervenant doit avoir comme préoccupation majeure l'amélioration de la fiabilité de l'outil industriel.

Les opérateurs de production sont impliqués dans la maintenance tandis que les agents de maintenances, assurent de plus en plus de tâches de maintenance préventive tout en effectuant des réparations efficaces et fiables. Le travail des techniciens d'intervention et de méthode vise à l'amélioration constante de la maintenance par la mise en place de méthodes élaborées en petit comité. La formation a également un rôle à jouer.

L'outil informatique s'est imposé dans cette démarche d'amélioration. La sous-traitance implique de nombreuses contraintes et son coût économique exacte doit être déterminé.

La maintenance n'est pas un processus mineur de l'entreprise, mais un processus essentiel. De nombreux dysfonctionnements observés dans d'autres fonctions prennent leur origine dans ce processus. Fort de cette certitude, la citation suivante prend alors tout son sens :

" quand la maintenance tousse, c'est toute l'entreprise qui s'enrhume ! "

1.10 Les évolutions de la maintenance dans les entreprises :

La maintenance est une résurgence de l'entretien, le service qui vivait à l'ombre de la production traitant les séquelles de l'entreprise, bien isolé, sans grande ingérence dans la stratégie de l'entreprise.

- Il gérait les pannes, chargé très souvent des services de l'énergie des installations, de l'environnement.
- Quoique toujours vigilant et en alerte, très dépendant des autres, il défendait avec difficulté sa réputation de mal nécessaire, de service non productif et coûteux.

Ses hommes polyvalents et débrouillards, étaient peu considérés et des moins bien rémunérés.

Une profonde mutation a fait naître un service nouveau, la maintenance, un partenaire intégré à part entière de l'industriel, de l'économie. En effet, des exigences nouvelles provoquées :

- par les grands progrès technologiques, automatismes, machines à commandes numériques, électronique, informatique,
- et par l'ouverture des marchés nationaux et internationaux, ont bouleversé les règles économiques.

Une compétitivité évolutive et incessante a provoqué une restructuration des stratégies de l'organisation des entreprises :

- un management participatif est apparu intégrant tous les services et les hommes, en les responsabilisant dans des objectifs dynamiques et collectifs.
- la maintenance, mutation du service entretien est venue comme partenaire actif et incontournable en amont dans l'organisation et les actions de l'entreprise, porteur des doctrines de fiabilité, de maintenabilité, de sûreté de fonctionnement, des exigences au niveau de la conception, des méthodes et de la production.

La maintenance s'est alors intégrée à toutes les démarches de l'entreprise pour affirmer son rôle qui est d'assurer une plus grande disponibilité et une plus grande pérennité des moyens de production, et participer à la qualité des produits, à la sécurité du personnel.

La politique de la maintenance est passée de l'ère du curatif, de la gestion de la panne, au stade du préventif conditionnel.

C'est le règne de la surveillance de l'état et des fonctions des équipements pour prévoir en temps utiles les interventions nécessaires sans perturber les programmes de production.

Des moyens techniques très évolués : appareils de mesure, capteurs, des systèmes électroniques et informatiques, permettent des diagnostics performants et participent à la mise en place progressive de ces nouvelles méthodes préventives, voire prédictives.

C'est un objectif d'optimisation des coûts d'interventions, de réduction des pannes et des arrêts de production.

1.10.1 Place de la maintenance dans les entreprises.

Les contraintes économiques poussent à avoir une meilleure disponibilité des ressources au meilleur coût. Les équipements sont de plus en plus sophistiqués. Les domaines couverts par la maintenance sont de plus en plus étendus : automatismes, électronique, informatique, etc... Les compétences doivent être de plus en plus pointues. On n'en a pas besoin tout le temps, à tous les instants, mais elles doivent être disponibles en cas de panne ou d'incident. C'est ce dilemme que se propose de résoudre le maintenancier: avoir la compétence adéquate au bon moment et au bon endroit sans qu'elle soit sous-utilisée, voire inutilisée le reste du temps, ce qui coûte forcément cher.

1.10.2 Evolution des objectifs assignés au service maintenance :

Une évolution générale s'est dessinée que l'on peut découper en 4 phases. Selon sa taille, son secteur et son organisation propre, chaque entreprise relève de l'une ou l'autre de ces 4 situations :

- Le service de maintenance intervient principalement en cas de problème (dépannage, réparation,..)
- Le service maintenance est là pour éviter les pannes et les ralentissements de production (mise en place de procédures de prévention systématiques des pannes majeures).
- Le service maintenance doit générer des profits (il doit être rentable, donc faire gagner plus d'argent qu'il n'en coûte : développement de méthodes de chiffrage budgétaire, maintenance préventive minimale, création de modèle de prévision de panne,...).
- Le service maintenance est en concurrence avec les sous-traitants mainteniciens (développement de l'externalisation de la maintenance)

1.10.3 Evolution de la maintenance curative vers la maintenance prédictive (préventive conditionnelle)

La maintenance n'est plus seulement curative (réparation). Elle est devenue « préventive » (maintenance effectuée de façon systématique selon un calendrier prédéfini) et même plus récemment prévisionnelle (grâce à l'évolution des technologies de diagnostic et de contrôle, cette nouvelle maintenance basée sur des techniques de prévision des pannes comme l'analyse vibratoire ou l'analyse des huiles se développe et permet de remplacer les pièces juste avant la rupture). Le passage de la maintenance curative à la maintenance prédictive n'est cependant pas systématique. Il vise moins à minimiser les coûts de maintenance qu'à les optimiser en fonction des objectifs de production. La figure ci-dessous montre la décroissance des interventions correctives en développant la maintenance conditionnelle et en particulier prédictive

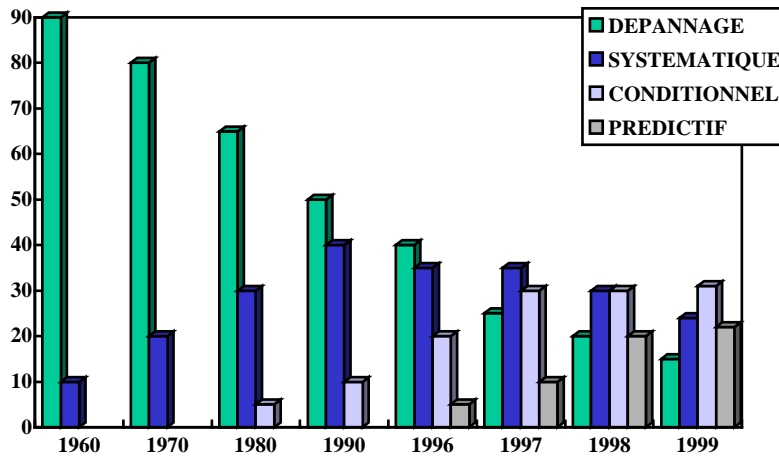


Figure 1-1: Evolution des différents type de maintenance durant les 40 années passées [HENR01]

1.11 Evolution technique

La modernisation croissante des processus de production se traduit notamment par l'informatisation, l'utilisation des automates programmables, leur mise en réseaux, la robotisation,... Cette évolution conditionne fortement le mode de maintenance et donc les compétences de l'homme de maintenance.

1.11.1 Les niveaux de maintenance

Une autre condition pour réussir un système de maintenance serait de spécifier les niveaux de maintenance dans l'entreprise. Monchy [MONC91], Nakajima [NAKA89, NAKA87] Lyonnais [LYON92] présentent cinq niveaux. Ceux-ci font référence à la complexité des tâches à effectuer et aux ressources humaines et matérielles nécessaires à la réalisation de chacune des tâches (tableau 2. 1).

Tableau 1-2 : les ressources nécessaires pour chaque niveau de maintenance.

Niveaux	Personnel d'intervention	Moyens
1	Exploitant sur place	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation.
2	Technicien habilité sur place.	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation, plus pièces de rechange trouvées à proximité, sans délai.
3	Technicien spécialisé, sur place ou en local de maintenance.	Outillage prévu plus appareils de mesure, banc d'essai, contrôle, etc.
4	Équipe encadrée par un technicien spécialisé, en atelier central	Outillage général plus spécialisé, matériel d'essai, de contrôle, etc.
5	Équipe complète, polyvalente en atelier central	Moyens proches de la fabrication par le constructeur.

1^{er} niveau : réglage simple prévu par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun montage d'équipement ou échange d'équipements accessibles en toute sécurité.

2^e niveau : dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet ou d'opérations mineures de maintenance préventive.

3^e niveau : identification et diagnostic de pannes, réparation par échange de composants fonctionnels, réparations mécaniques mineures.

4^e niveau : travaux importants de maintenance corrective ou préventive.

5^e niveau : travaux de rénovation, de reconstruction ou réparations importantes confiées à un atelier central.

1.11.2 Maintenance de base confiée aux opérateurs de production

Les grandes entreprises confient de plus en plus la maintenance de 1^{er} niveau (réglages, échanges de consommables standards), voire de 2^{ème} niveau (graissage, contrôle du fonctionnement) aux opérateurs de production.

1.11.3 Externalisation de la maintenance

La part des activités de maintenance confiée à des entreprises extérieures spécialisées augmente pour plusieurs raisons : le travail est confié à des spécialistes, les entreprises peuvent se recentrer sur leur fonction principale et déléguer ce qui ne relève pas de leur métier, l'externalisation minimise les coûts de personnel. En France, 75 % des « hommes de maintenance » travaillent encore dans les services maintenance des entreprises de production et 25 % dans les entreprises de sous-traitance (chiffres du BIPE).

1.12 Développement des normes et méthodes

Progressivement, les entreprises s'engagent dans des processus de certification et mettent en place des politiques de qualité totale. Les activités de maintenance se doivent de formaliser leurs procédures et d'appliquer ces politiques.

1.12.1 Recherche des polycompétences

Les outils de productions intègrent toujours plus de technologies différentes qui évoluent continuellement (mécanique, électricité, pneumatique, automatisme,..). De cette situation découle une demande forte de la part des entreprises en termes de polycompétence et de capacité de s'adapter techniquement.

1.12.2 Poids croissant des bureaux

La part croissante accordée à la gestion, aux méthodes, à l'organisation, entraîne une tendance à localiser les futurs emplois de la maintenance plus dans les bureaux (fiabilistes, méthodes, GMAO,...) que dans les ateliers.

1.13 Développement de la Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO)

La principale transformation affectant la gestion de la Maintenance est le passage à la Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO) : un progiciel organisé autour d'une base de données permettant de programmer et de suivre sous les 3 aspects technique, budgétaire et organisationnel, toutes les activités d'un service maintenance.

Plus récemment encore (1999-2000), on a vu la GMAO « traditionnelle » se muer en EAM (Entreprise Assets Management) ou Gestion Productive des Actifs (GPA). La GPA permet de mieux contrôler les dépenses de maintenance. Elle ne se limite pas à gérer la

maintenance mais cherche à utiliser efficacement les procédures de maintenance pour tirer le meilleur parti de l'outil de production et des ressources.

1.14 Le e-maintenance

On assiste, depuis 2 ans, au développement du MRO (Maintenance Repair and Operation) qui constitue une véritable opportunité d'automatisation de l'achat des pièces de rechange au travers du Net puisque l'opération se déroule au sein de place de marché électronique sur lesquelles il est possible d'acheter et de vendre tous les articles nécessaires à la maintenance. En liaison avec cette évolution, on voit les progiciels de GMAO intégrer partiellement ou totalement le Web.

1.15 La télémaintenance

Après la télésurveillance (les installations d'une entreprise sont équipées d'alarmes qui transmettent les anomalies à la centrale de télésurveillance 24h sur 24. Un technicien est envoyé sur place, si la nature de la panne le justifie) les grandes entreprises essayent de développer la télémaintenance. Ce système doit permettre de rapatrier et de traiter toutes les informations techniques de la maintenance et d'agir à distance en connaissance de cause. On peut donc à la fois, faire du diagnostic et de transmettre des ordres à distance. Pour des entreprises de taille petite ou moyenne, la télémaintenance permet l'optimisation et le partage des ressources humaines détentrices de l'expertise. Les grandes entreprises peuvent de cette manière gérer plusieurs sites par la même équipe de spécialistes.

A l'heure actuelle, très peu de sociétés tentent l'expérience de la télémaintenance, mais il est clair que c'est une technique d'avenir vers laquelle de plus en plus d'entreprises vont tendre. L'avancée technologique très rapide des « TIC » est de nature à faciliter l'utilisation de ces nouvelles méthodes.

1.16 La maintenance et la sûreté de fonctionnement

Dans sa définition originelle, le terme "sûreté de fonctionnement" représente "l'ensemble des aptitudes d'un produit qui lui permettent de disposer des performances fonctionnelles spécifiées, au moment voulu, pendant la durée prévue, sans dommage pour lui-même et son environnement" [AUG98]. La sûreté de fonctionnement couvre ainsi les quatre notions que sont la fiabilité, la sécurité, la maintenabilité et la disponibilité, auxquelles on peut ajouter, selon les applications, la survivabilité et l'invulnérabilité.

La sûreté dans son ensemble doit être étudiée d'un bout à l'autre de la conception du système.

Elle se fera par:

- le choix des composants de la partie opérative : puissance et distribution d'énergie
- l'implantation des composants
- le choix de la partie commande et de son câblage
- les procédures de fonctionnement

Tableau 1-3 : Les paramètres de la sûreté de fonctionnement

<p>Sûreté de fonctionnement Aptitude à assurer un service spécifié</p>			
Sécurité	<p>+ Disponibilité Aptitude à être en état de marche à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné</p>		
<p>Aptitude à ne présenter aucun danger pour les personnes, les biens et l'environnement.</p>	<p>Fiabilité Aptitude à ne pas présenter de défaillance dans une durée déterminée.</p>	<p>+ Maintenabilité Aptitude à être remis en service dans une durée donnée.</p>	<p>+ Logistique de Maintenance Politique et moyens de maintenance.</p>

La fiabilité représente "l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée" [AFN98].

La sécurité est "l'aptitude d'un système à accomplir sa fonction sans causer de lésion ou d'atteinte à la santé" [AFN98].

La maintenabilité est "l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise lorsque la maintenance est réalisée dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits" [AFN98].

La disponibilité est, quant à elle, "l'aptitude d'un bien, sous les aspects combinés de sa fiabilité, maintenabilité et de l'organisation de maintenance, à être en état d'accomplir une fonction requise, dans des conditions de temps déterminées" [AFN98].

Aujourd'hui cependant, on tend à une acceptation élargie de cette définition en étendant le sens de sûreté de fonctionnement à une notion plus générale de maîtrise du risque, maîtrisant tant économique que sécuritaire ou opérationnelle. Ainsi, dans le domaine initial des défaillances techniques, on va s'intéresser également au pilotage des coûts d'exploitation et de la disponibilité. Ces derniers, devenus enjeux majeurs de la compétitivité de nombreux produits, conduisent les industriels à développer des approches qui permettent une maîtrise de ces paramètres par leur prise en compte, dès les phases "avant projet" jusqu'à la phase d'exploitation.

1.17 Le processus de maintenance

Au-delà des définitions, et pour améliorer la compréhension de ce qu'est l'action

De maintenance, G. Zwingelstein [ZWI96] évoque le processus de maintenance ainsi :

De l'analyse de ce processus se dessine donc le besoin d'optimiser les politiques de maintenance.

1.18 Politiques de maintenance

L'analyse des politiques de maintenance en vue d'optimiser la performance des entreprises (de différents points de vue allant du financier à la disponibilité) est un sujet de recherche exploré par de nombreux laboratoires. Bien que n'étant pas l'objet principal de ce travail de thèse, nous ne pouvons exposer la maintenance et ses coûts sans évoquer l'optimisation par l'amélioration des politiques de maintenance au travers d'une courte analyse bibliographique [AUBU97].

1.18.1 Les politiques de maintenance

Faut-il réparer complètement un système lorsqu'il tombe en panne ? Est-il préférable de le réparer à moindre coût en réparant uniquement les composants nécessaires à son bon fonctionnement ? Comment choisir le degré optimal de maintenance corrective ? Voici autant de problèmes industriels auxquels répond l'analyse des politiques de maintenances [AFN86].

La maintenance est en effet un processus qui se caractérise par des choix d'exécution. La juste répartition entre les différents modes de maintenance envisageable, appelée détermination des politiques de maintenance, a un impact non négligeable sur les coûts de possession d'un système.

1.18.2 Les indicateurs de performance de la maintenance

Il est impossible d'améliorer un système sans en avoir décrit les caractéristiques : dans notre cas, c'est au travers d'indicateurs de performance qu'est analysée la maintenance. Un "indicateur" est une information choisie, associée à un phénomène et destinée à en observer périodiquement les évolutions au regard d'objectifs préalablement définis. [BERR02]

Si le nombre d'indicateurs doit être limité, ils doivent néanmoins permettre d'évaluer l'impact de la maintenance sur le système. Pour cela, la norme française XP X 60-020

[AFN95] présente des indicateurs de coût de maintenance, de disponibilité (et par extension de coût d'indisponibilité), de niveau de sécurité et de coût de la défaillance.

Ces indicateurs sont bien souvent ramenés à des ratios tels que le rapport des coûts de maintenance sur la valeur du bien à maintenir, ou encore le rapport entre les coûts et l'usage :

- coût par heure de production
- coût par km parcouru
- etc.

Par conséquent, il apparaît que tous les indicateurs (à l'exception des indicateurs de niveau de sécurité) se regroupent autour de problèmes de rentabilité. Les facteurs de performance en maintenance sont représentatifs d'une part, de ce que coûte la maintenance et d'autre part, de la disponibilité associée, à savoir ce que rapporte le système.

En nous appuyant sur ces indicateurs, nous analyserons plus en détail les notions de coûts de maintenance.

Conclusion ;

Au cours de ce chapitre , nous avons défini les différentes méthodes de maintenance. Il est important de connaître les grandeurs et les mécanismes qui en résultent pour pouvoir implanter un système de maintenance efficace et rentable. Puis, nous avons défini le système de gestion de la maintenance avec ses différents aspects préventifs et correctifs. Nous avons dressé la typologie de ce dernier et nous l'avons positionner par rapport au système de production.

Dans le prochain chapitre, nous allons faire une analyse détaillée de la disponibilité des installations et en particulier celle de la centrale électrique de Annaba.

1.19 Une priorité à la disponibilité des équipements :

Un des objectifs fixés à cette étude, était d'interroger les industriels sur leurs priorités maintenance à moyen terme et les défis à affronter pour les années à venir. Parmi les priorités citées par les industriels, l'amélioration de la disponibilité des équipements reste la préoccupation majeure.

En deuxième priorité, on trouve un groupe de 3 thèmes, directement rattachés à cette disponibilité, qui sont : la maîtrise des coûts directs, l'organisation interne de la maintenance et la mise en place de l'automaintenance.

Ces deux derniers thèmes, sont dans la droite ligne des stratégies actuelles qui visent à repositionner les ressources internes sur les performances de l'outil de production. L'aspect économique reste une des grandes priorités, avec une vision limitée aux coûts directs plutôt que "coût global de possession", ce dernier intégrant les charges d'exploitation et de maintenance.

Le développement de la sous-traitance, l'informatisation de la maintenance et le rapatriement d'activités sous-traitées, sont loin derrière et ne concernent que quelques % d'entreprises.

Pour l'informatisation, ceci s'explique par le fait que beaucoup d'entreprises ont déjà informatisé leur maintenance.

Pour la sous-traitance, les entreprises y ont déjà recours depuis plusieurs années en ce qui concerne les domaines dits «non stratégiques». La priorité actuelle est plus à la maîtrise de cette sous-traitance par l'organisation interne (priorité 3) qu'à son développement proprement dit. Cette situation peut apparaître en contradiction avec les tendances annoncées et révéler une situation d'attente dite "de milieu de gué".

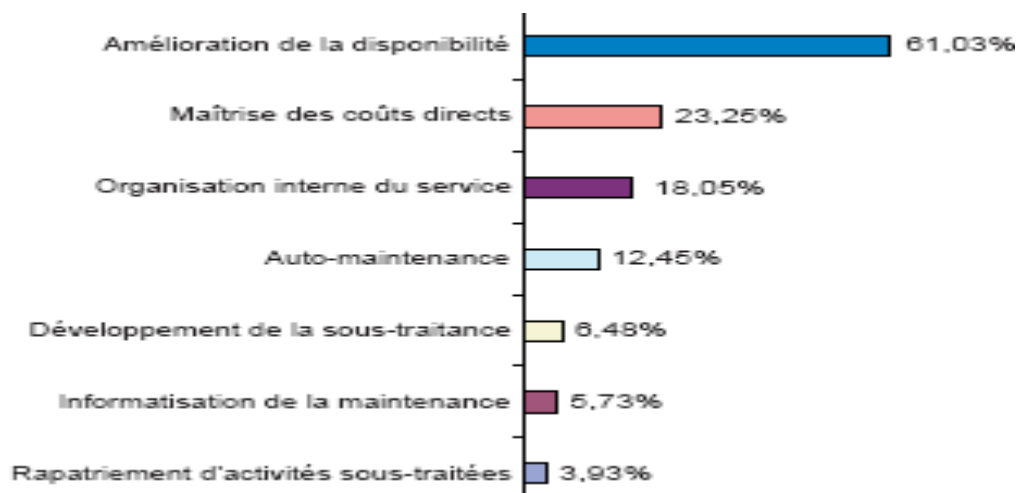


Figure 1-2 : Priorités à moyen terme de la maintenance

1.20 La maintenance et ses coûts

Longtemps jugée par les entreprises comme un poste de dépense inévitable, la maintenance se libère aujourd'hui de cette réputation pour être considérée comme un facteur de compétitivité jouant un rôle fondamental dans la maîtrise des risques, qu'ils soient sécuritaires, financiers ou environnementaux.

Une entreprise doit se contenter d'avoir les indicateurs techniques (Fiabilité, disponibilité), et économiques (Coûts de maintenance). L'un des objectifs des entreprises est de rechercher l'équilibre technico-économique des équipements de production. Pour cela il est nécessaire de faire une évaluation des conséquences économiques pour l'utilisation d'une politique de maintenance. Cela nous permettra d'exprimer le coût d'une politique de maintenance, les coûts directs et indirects de maintenance et ceux de remise en marche. Le décideur d'une entreprise pourra se servir de ces résultats pour mieux appréhender son budget de maintenance étant donné que l'insuffisance des moyens financiers est le nerf de la guerre de ces structures industrielles.

1.20.1 Evaluation des conséquences économiques

1.20.1.1 Définition et concepts

Les coûts de maintenance représentent l'ensemble des dépenses engagées pour maintenir en état de fonctionnement un système complexe. Bien souvent ils sont associés à des exigences de fonctionnement en terme de sécurité, de fiabilité ou encore de disponibilité. [DHIL89].

Leur décomposition s'établit comme suit :

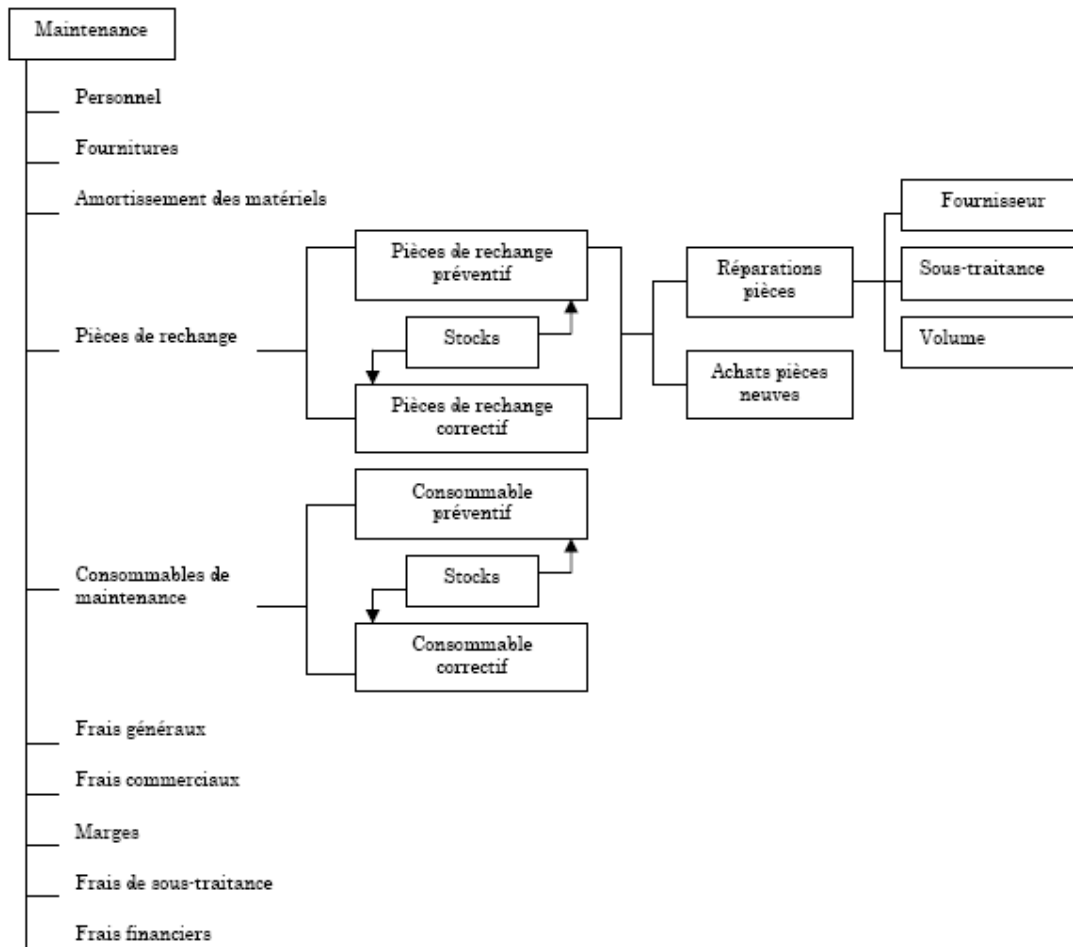


Fig. 1.3 : Décomposition des coûts de maintenance

Partant de ce graphique, nous pouvons dire que le rôle le plus souvent dévolu aux analyses de maintenance et de sûreté de fonctionnement concerne l'étude des effets d'une défaillance. Les méthodes employées visent à identifier individuellement leurs conséquences en terme de coûts. C'est le cas des systèmes où pour une défaillance de multiples conséquences peuvent survenir. La méthode de l'arbre des conséquences propose d'y remédier à l'aide d'un arbre de décision. Elle consiste à établir les conséquences faisant suite à un événement initiateur et selon les successions possibles des fonctionnements ou dysfonctionnements. Dans notre thèse nous avons:

- Événement initiateur : cause de défaillance
- Événements : arrêt, fonctionnement, ou fonctionnement en mode dégradé.
- Conséquences : C1 (succès): coût de la politique;
- C2 (en marche avec dégradation) : coût de la politique, coût direct;
- C3 (fonctionnement en mode dégradé) : coût de la politique, coût direct de la dégradation, coût indirect, coût remise en marche;

- C4 (Avec arrêt) : coût de la politique, coût direct d'arrêt, coût indirect, coût remise en marche.

L'intérêt de cette méthode réside dans l'exploration exhaustive des séquences suite à une défaillance et dans le fait que la quantification soit possible.

1. Catégorie 1 notée C1:

Cette catégorie représente le coût de l'utilisation de la politique de maintenance notée Cp.m

$$\mathbf{C1 = Cp.m} \quad [1.1]$$

2. Catégorie 2 notée C2:

Cette catégorie représente la somme du coût de la politique de maintenance Cp.m et du coût direct de dégradation Cd1. C'est le cas du fonctionnement avec dégradation sans nuisance à la production.

$$\mathbf{C2 = Cp.m + Cd1} \quad [1.2]$$

3. Catégorie 3 notée C3:

Cette catégorie représente la somme du coût de la politique de maintenance Cp.m, le coût direct de dégradation Cd1, le coût indirect Cind1 causé par la perte de la production pour fonctionnement en mode dégradé et du coût de remise en marche Cr.m. C'est le cas du fonctionnement en mode dégradé avec perte de production ;

$$\mathbf{C3 = Cp.m + Cd1 + Cind1 + Cr.m} \quad [1.3]$$

4. Catégorie 4 notée C4:

Cette catégorie représente la somme du coût de la politique de maintenance Cp.m, le coût direct de dégradation Cd2, le coût indirect Cind2 causé par l'arrêt de production pour remédier à la défaillance et du coût de remise en marche Cr.m. C'est le cas où une défaillance entraîne l'arrêt de l'équipement de production avec perte de production.

$$\mathbf{C4 = Cp.m + Cd2 + Cind2 + Cr.m} \quad [1.4]$$

Les différentes expressions de $C_{p.m}$, C_{d1} , C_{d2} , C_{ind1} , C_{ind2} , $C_{r.m}$ sont formulées dans les paragraphes a, c, d, et e.

Les coûts d'acquisition ou coût d'achat, de revente ou d'élimination ne sont pas pris en compte dans nos travaux. Seuls les coûts cumulés de maintenance composés :

- Des coûts de la panne ou de la dégradation suivant les cas;
- Des coûts cumulés de la politique maintenance préventive;
- Des coûts de remise en marche;
- Des coûts de perte de production ou manque à gagner (produits non fabriqués, main d'oeuvre non utilisée, etc.); font l'objet de développement dans l'évaluation de notre modèle car, l'objectif n'est pas d'obtenir le revenu global d'un équipement de production ou d'estimer le coût global d'acquisition également connu sous sa dénomination anglo-saxonne de « Life cycle Costs » ou LCC.

D'autre part il y a un certains nombres de coûts que nous ne pourrions pas prendre en compte par manque de données ou d'informations:

- Impact sur l'environnement;
- Impacts commerciaux;
- Dommages corporels;
- Impacts juridiques;
- Image de marque;
- Etc.

1.20.1.2 Coût de la politique de maintenance : $C_{p.m}$

Il est égal au rapport de la somme des coûts directs de maintenance et des impacts sur la production (se traduisant en terme de manque à gagner et de perte de production) sur la somme de la moyenne des temps de fonctionnement et de réparation. (On néglige parfois la MTTR faible par rapport au MTBF).

$$C_{pm} = \frac{C_d + C_{ind}}{MTBF + MTTR} \quad [1.5]$$

avec :

$$C_d = C_{d1} + C_{d2} \quad \text{et} \quad C_{ind} = C_{ind1} + C_{ind2} \quad [1.6]$$

Toute politique de maintenance mise en oeuvre entraîne un certain coût et une réponse de l'équipement de production en terme de fiabilité et disponibilité résultant de son utilisation. Il est à noter que trop de maintenance préventive n'est souvent pas économiquement viable. Chaque industrie doit trouver le niveau à atteindre (voir figure ci-dessous).

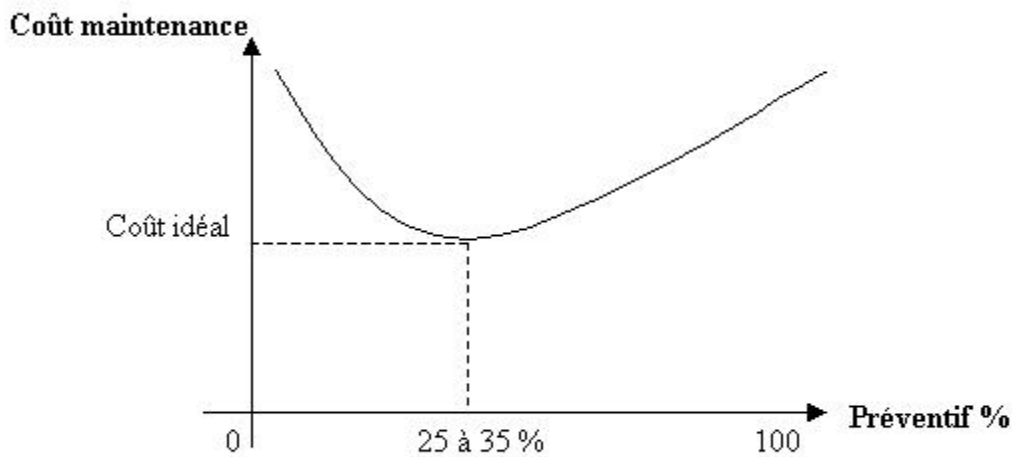


Figure 1. 4 : Coût idéal de maintenance préventive

- Hypothèses sur MTBF et MTTR

Pour effectuer l'évaluation sur le coût de la politique de maintenance, nous posons des hypothèses suivantes relatives aux lois de probabilités modélisant la moyenne des temps de bon fonctionnement et de réparation.

Les temps de bon fonctionnement et de réparation d'un équipement de production sont proportionnels à une période de temps considérés.

Les constantes de proportionnalité λ et μ , qui correspondent au taux de défaillance du matériel en fonctionnement et de réparation sont égales chacune en ce qui la concerne lorsque les temps de défaillance et de réparation sont supposés constants à :

$$\lambda = 1 / \text{MTBF} \quad [1.7]$$

Et

$$\mu = 1 / \text{MTTR} \quad [1.8]$$

La moyenne des temps de bon fonctionnement et de réparation sont ainsi modélisées par la loi exponentielle car les temps entre défaillances et réparation suivent une loi exponentielle.

L'estimateur ponctuel fréquentiel de la distribution de la loi fréquentielle est la valeur unique, considérée optimale notée λ d'une part et μ de l'autre.

L'estimateur du maximum de vraisemblance est celui qui conduit à la plus grande probabilité d'observer les données recueillies en observant n défaillances et r réparations indépendantes aux temps $T_1, T_2 \dots T_k$ de fonctionnement et $t_1, t_2 \dots, t_n$ de réparation.

Le maximum de vraisemblance correspond au maximum de la distribution de la fonction de

vraisemblance [PRO 92]. Pour obtenir le point maximal de cette distribution, on obtient les valeurs :

C'est à dire que le taux de défaillance est égal au nombre total de défaillances observés, divisé par le cumul des temps de fonctionnement.

Et le taux de réparation est égal au nombre total de réparation observé, divisé par le cumul des temps de réparation.

En rendant égaux les équations (1.7) et (1.8) nous obtenons:

$$\lambda = n / T \quad [1.9]$$

$$\mu = r / t \quad [1.10]$$

C'est à dire que la moyenne des temps de bon fonctionnement est égal au cumul des temps de fonctionnement, divisé par le nombre total de défaillances observés.

Et la moyenne des temps de réparation est égal au cumul des temps de réparation, divisé par le nombre total de réparation.

En dehors de la loi exponentielle, il existe bien la loi de Weibull et la loi normale qui peuvent bien caractériser le taux de défaillance et de réparation [LIG 92]. La loi exponentielle bien sûr n'est pas trop représentative dans l'évaluation concernant le taux de défaillance et de réparation, mais, elle simplifie au maximum les calculs. Elle donne des indications par rapport à ces taux de défaillance λ et de réparation μ .

1.20.2 Les coûts de maintenance directs

1.20.2.1 Analyse des coûts de maintenance

Les coûts impliqués dans une politique de maintenance peuvent être dissociés en coûts compressibles et incompressibles. Dans la première catégorie interviennent le prix des

éléments de rechange et la main d'oeuvre, quelle que soit la maintenance envisagée. Aucun gain n'est alors possible. En ce qui concerne la deuxième catégorie, une seule variable est à prendre en compte : le coût de l'indisponibilité liée à l'action de maintenance à effectuer. Ce dernier correspond à une perte sèche d'exploitation. [MART94]

Le tableau suivant présente ces coûts ainsi :

Type de coût	Maintenance préventive	Maintenance corrective
Incompressible	Coût de la pièce et coût de main d'œuvre	
Soumis à caution	Indisponibilité (réduite car maintenance en phase d'arrêt)	Indisponibilité (risquée car à tout moment en service)

La perte d'exploitation est un indicateur qui s'applique parfaitement aux systèmes de production. Cependant, dans le cas des systèmes de transport, les coûts de l'indisponibilité peuvent être très variables en fonction du besoin du système.

Il paraît évident que la criticité de l'indisponibilité d'un appareil pour une compagnie aérienne dépend directement du besoin que celle-ci a de son avion. La perte d'exploitation est en outre dépendante de l'usage pour lequel est prévu le système : pour la même indisponibilité d'un jet privé, la perte sera beaucoup plus importante dans le cas d'un voyage d'affaire reporté que dans celui de vacances annulées !

Aussi, bien que ces coûts représentent des sommes considérables, nous limiterons nos études à leur part incompressible : le DMC.

1.20.2.2 Le coût direct de maintenance (DMC)

La notion de DMC pour Direct Maintenance Cost (en français "coût direct de maintenance") est aujourd'hui largement utilisée comme représentation des coûts de maintenance.

Cependant sa définition n'est pas toujours rigoureuse, et le périmètre d'analyse qu'elle comprend est trop souvent franchi.

Le DMC dans sa définition selon [GOSS99] représente l'ensemble des coûts directs permettant la maintenance d'un matériel. Il comprend donc les pièces de rechange, les consommables, la main d'oeuvre de réparation ou de remplacement, l'amortissement des outillages mais ne comprend pas les coûts logistiques associés à l'entretien des machines, ou encore les coûts de démontage d'un élément en panne. Le DMC peut se décomposer de la manière suivante :

- les dépenses de main d'oeuvre technique d'exécution imputables avec certitude :

- à des tâches de maintenance programmées ou non programmées
- à l'application des modifications impératives pour des raisons de sécurité
- aux frais de l'assistance technique du constructeur, du motoriste et des équipementiers pour les travaux de maintenance et de réparation
- les dépenses en pièces de rechange et en éléments consommables, réparables et révisables, effectivement utilisés pour l'entretien, les révisions et les réparations de la structure, des systèmes, des équipements et des moteurs.

De nombreux paramètres influencent ces coûts, ce sont dans l'aéronautique [GIFA97] : la durée moyenne du vol, l'utilisation journalière, l'efficacité de la main d'oeuvre, les taux horaires, la part des travaux effectués dans la compagnie par rapport à ceux sous-traités, etc.

Notons que le coût de maintenance n'est pas constant durant la durée de vie de l'appareil et qu'il faut tenir compte :

- de l'effet d'apprentissage ("learning") sur les temps de main d'oeuvre
- de l'effet d'évolution des périodicités entre les visites de maintenance programmée et d'évolution des périodicités entre les révisions (TBO)
- de l'effet des garanties applicables à chaque appareil et à chacun de ses équipements, durant les premières années d'utilisation
- de l'effet de vieillissement.

Enfin, signalons que le DMC est un coût généralement exprimé par mesure d'usage : on parle de coût de maintenance par heure de fonctionnement, par Km parcouru ou encore par masse transportée sur une distance donnée. L'aéronautique emploie en général la notion de coût de maintenance par heure de vol comme système de référence.

On a alors l'indicateur suivant :

$$\begin{array}{l}
 \text{DMC} = \underbrace{(\text{coût d'un élément} / \text{MTBF}) + (\text{coût de réparation} / \text{MTBF})}_{\text{Eléments remplacés}} \\
 + \underbrace{(\text{coût d'un élément} / \text{TBO}) + (\text{coût de réparation} / \text{TBO})}_{\text{Eléments réparés}}
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Correctif} \\ \text{Préventif} \end{array}$$

Figure 1. 5 : L'indicateur de coûts directs de maintenance

Cet indicateur, classiquement utilisé dans l'aéronautique, sera notre référence dans la suite de ces travaux.

1.20.2.3 Les coûts de maintenance indirects (IMC)

L'IMC comprend :

- le coût du personnel non imputable, avec certitude, à une tâche de maintenance
- l'instruction du personnel
- les dépenses d'entretien, de réparation des outillages, spécifiques ou non
- les dépenses liées à l'évolution et à la mise à jour de la documentation technique
- les dépenses d'infrastructures, d'entretien des installations, des véhicules
- les dépenses administratives liées au recours en garantie
- etc.

L'IMC est un coût faiblement compressible, lié presque exclusivement à des charges administratives ou législatives. Ne dépendant pas directement de l'aspect technique, la marge de manœuvre associée pour son optimisation est finalement très mince. L'IMC est souvent exprimé en pourcentage du DMC, ce qui signifie qu'il suffit de calculer ce dernier pour obtenir le coût total de maintenance. Aussi approfondissons notre analyse du DMC.

Les coûts de perte de production ou manque à gagner (produits non fabriqués, main d'œuvre non utilisée, etc..) sont calculés à partir des rebuts imputables aux pannes de l'équipement.

Le manque à gagner peut-être écrit sous la forme suivante:

- Pour le fonctionnement en mode dégradé;

$$C_{ind1} = \omega \cdot C_{h1} \cdot H_1 \quad [1.11]$$

Avec :

C_{h1} - le coût horaire de la dégradation;

H_1 - le nombre d'heures de fonctionnement en mode dégradée;

ω - le coefficient d'occupation de l'équipement.

- Pour l'arrêt de production

$$C_{ind2} = \omega \cdot C_{h2} \cdot H_2 \quad [1.12]$$

C_{h2} : le coût horaire d'arrêt;

H_2 : le nombre d'heures d'arrêt.

Le coefficient d'occupation de l'équipement de production sera obtenu sur la base du rapport entre le cumul du temps de fonctionnement T et le cumul du temps d'ouverture N .

$$\omega = T / N \quad [1.13]$$

Le coût d'une heure d'arrêt C_h sera calculé sur la base du produit du nombre de produits non fabriqués (N_f) pour une heure d'arrêt, par le coût unitaire du produit C_u .

$$C_{h2} = N_f \times C_u \quad [1.14]$$

En mode dégradé, on suppose que la moitié de la production est perdue :

$$C_{h1} = (N_f / 2) \times C_u \quad [1.15]$$

Le coût unitaire C_u est obtenu auprès de la comptabilité de l'entreprise.

1.20.3 coûts de remise en marche : $C_{r.m}$

Se sont des coûts qui sont estimés après réparation due à une défaillance du matériel. Ils sont caractérisés par le temps qui s'écoule entre la fin de la réparation et la reprise du fonctionnement de l'outil de production en régime nominal.

Nous l'exprimons par:

$$C_{r.m} = C_{h2} \cdot h \quad [1.16]$$

h : durée de reprise de fonctionnement de l'équipement en régime nominal.

Les coûts de remise en marche s'expriment avec la même expression [1.16] qu'il s'agisse de la remise en marche après dégradation qu'après défaillance avec arrêt de l'équipement de production.

L'obtention de ces différentes conséquences économiques nous permet d'aborder le processus de prise de décision. C'est ce que va nous présenter le chapitre 4.

1.21 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons défini les différentes méthodes de maintenance et leurs coûts. Il est important de connaître les grandeurs et les mécanismes qui en résultent pour pouvoir implanter un système de maintenance efficace et rentable. Puis, nous avons défini le système de gestion de la maintenance avec ses différents aspects préventifs et correctifs. Nous avons dressé la typologie de ce dernier et nous l'avons positionné par rapport au système de production.

Les outils de calcul du coût de maintenance se basent sur une représentation très simplifiée du système étudié sans tenir compte de la complexité engendrée par l'environnement (marché, conjoncture, etc.), la technologie employée, l'activité de l'entreprise et la spécificité ou l'usage du produit.

Ces insuffisances soulignent donc la nécessité de créer de nouvelles méthodes d'estimation de coût de maintenance, adaptées aux besoins actuels et donnant des résultats avec une précision suffisante pour aider à la prise de décision des choix technologiques. Par conséquent, il est intéressant de se pencher sur les méthodes de prévision de coût utilisées dans des domaines autres que celui de la maintenance.

Le calcul de DMC nous montre comment à partir d'informations techniques très sommaires nous pouvons faire une estimation pertinente de coûts de maintenance et donc de coût d'exploitation d'un équipement.

Ce calcul peut être réalisé sur n'importe quel élément à condition de disposer d'un minimum de données techniques ou d'expertise pour réaliser une évaluation de coût pertinente.

Notons pour finir que les outils présentés dans ce chapitre peuvent être utilisés dans le cadre de la maîtrise des coûts d'exploitation. Dans ce cas, soit on maîtrise la fiabilité soit on maîtrise les coûts.

Pour ce qui est de la maîtrise des coûts il s'agit principalement de procédure d'ingénierie, et éventuellement, d'actions commerciales d'engagement fournisseur.

En nous limitant à l'utilisation directe des travaux présentés dans cette partie, nous montrerons comment une bonne construction de la fiabilité permet de réduire les coûts d'exploitation d'un système.

Dans le prochain chapitre, nous allons faire une analyse détaillée de la disponibilité des installations et en particulier celle de la centrale électrique de Annaba.

Chapitre 2

Analyse de la disponibilité des installations de production

2.1 Introduction

La fiabilité et la disponibilité instantanée sont à l'évidence des aptitudes que doivent nécessairement posséder les systèmes assurant des missions pour lesquelles la sécurité des usagers et la sauvegarde de l'environnement (incluant les systèmes eux-mêmes) est primordiale. Il existe cependant une autre problématique qui est celle de la disponibilité de production qui conditionne la capacité de production moyenne d'une installation sur une période donnée. La disponibilité des équipements de production constitue l'une des préoccupations prioritaires des industriels et, par là-même, devrait susciter l'intérêt des universitaires. Afin de contribuer modestement à l'éveil de cet intérêt, nous souhaitons, dans ce chapitre, rappeler en quoi consiste la notion de disponibilité de production et montrer qu'elle constitue un indicateur quantitatif pertinent qui révèle la performance globale de tout système de production. Notre démonstration expérimentale est basée sur l'étude d'une centrale électrique (cas de la centrale électrique de Annaba) [BOUI91], [DEGR95]..

2.2 Fiabilité principes et définitions

2.2.1 Avant propos

Si l'ingénieur définit la fiabilité comme "l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions données et pour une période de temps donné", le mathématicien transforme cette définition en parlant de "probabilité d'accomplir une fonction requise".

Selon la norme X60-500 La fiabilité R - *Reliability* - est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise pendant un intervalle de temps donné, dans des conditions données.

2.2.2 Définition et notations

Ce paragraphe expose des travaux bibliographiques permettant une bonne compréhension des notions de sûreté de fonctionnement utilisées dans nos travaux.

2.2.3 Fiabilité

La fiabilité d'un groupe d'éléments à un instant t est la probabilité de fonctionnement sans défaillance pendant la période [0, t], c'est donc la probabilité que l'instant de première

défaillance T soit supérieur à t. Bien entendu, cette définition posée sur une échelle en temps de fonctionnement est tout aussi valable avec une autre unité, par exemple en Km ou en nombre de cycles d'usage.

$$R(t) = P(T > t)$$

Cette fonction fiabilité, ou fonction de survie, se calcule aisément :

$$R(t) = \text{Nbre d'éléments en vie à l'instant } t / \text{Nbre d'éléments au total}$$

On peut également présenter la fonction cumulative de panne F(t) comme la probabilité qu'il survienne une panne avant la date t. Il s'agit du complément de R(t) :

$$F(t) = 1 - R(t)$$

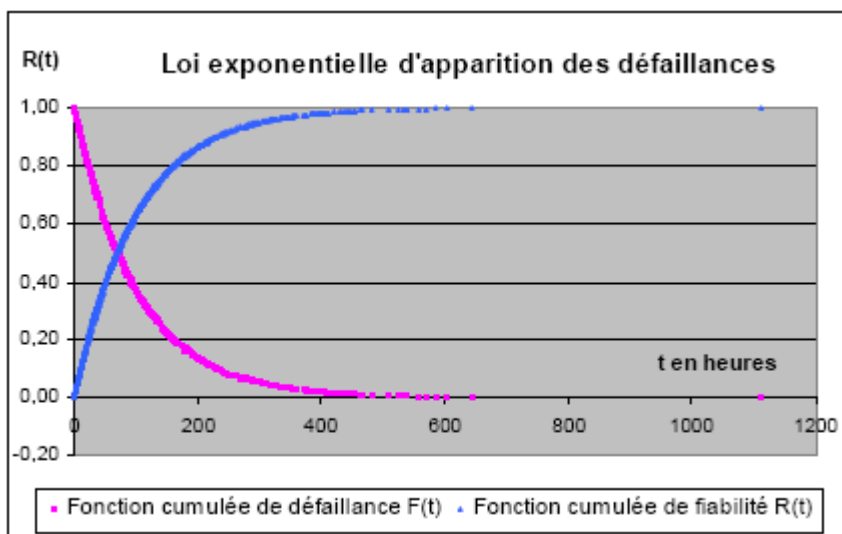


Fig. 2-1 : Loi exponentielle d'apparition des défaillances

On définit ensuite la fonction f(t), à savoir la densité de probabilité de la variable T. Cette fonction multipliée par dt peut être interprétée comme la probabilité de défaillance entre t et t + dt. On la définit comme suit :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} = \text{prob} \{t < T < t + dt\} \quad [2.1]$$

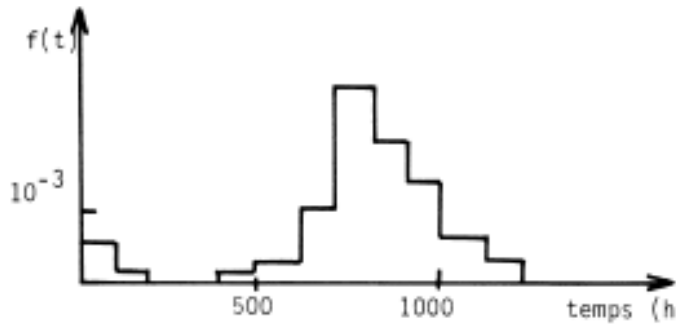


Figure 2.2 - Densité de probabilité de défaillance

2.3 Défaillance et taux de défaillance

La défaillance est la cessation d'une aptitude à accomplir une fonction requise, c'est le passage de l'état de fonctionnement à l'état de panne. On distingue sa cause (circonstance ayant entraîné la défaillance) de son mécanisme (processus ayant entraîné la défaillance) et du mode de panne associé (un des états possibles d'une entité en panne pour une fonction requise).

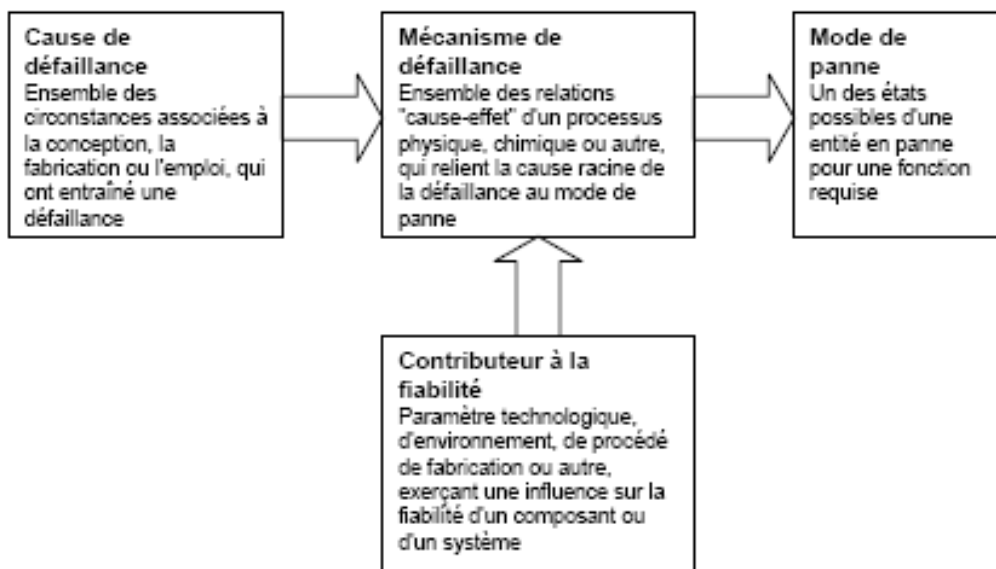


Fig. 2.3 : Définition des concepts de fiabilité

Le taux de défaillance représente la proportion de dispositifs qui, ayant vécu un temps t, ne sont plus en vie à t + dt. Il s'agit de la probabilité conditionnelle suivante :

$$h(t).dt = \lambda(t) = \frac{\text{Prob}(t \leq T < t + dt)}{\text{Prob}(T \geq t)} = \frac{\text{Nombre de défectueux au cours de } dt}{\text{Nombre d'éléments total}} = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)} \quad [2.2]$$

Particulièrement importante, cette notion représente statistiquement le nombre de pannes se produisant au cours d'une unité de temps rapporté au nombre d'éléments fonctionnant encore sans défaillance.

L'observation expérimentale montre que l'évolution du taux de défaillance en fonction du temps est en général représentée par la courbe suivante dite "courbe en baignoire".

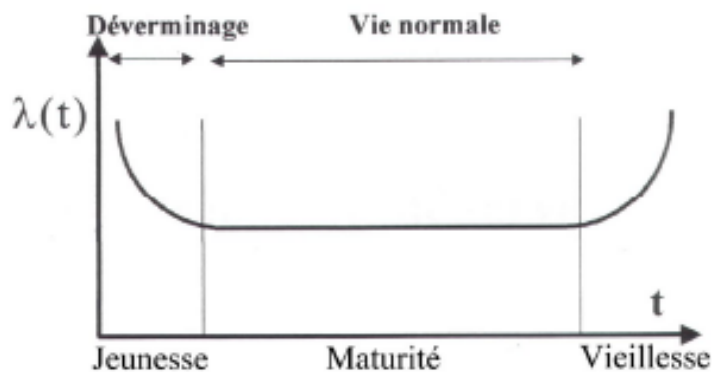


Fig. 2.4- Taux de défaillance, Courbe en baignoire

La vie d'un composant peut donc être divisée en trois périodes :

- période de jeunesse, défaillances précoces
- période de vie utile, taux de défaillance sensiblement constant
- période de vieillesse, défaillances d'usure.

Lors de la période de jeunesse, le taux de défaillance diminue : la probabilité de panne d'un composant décroît avec le temps, les défaillances sont dues à des problèmes de qualité (mise en place des procédés et déverminage).

La période de vie utile est représentée par un taux de défaillance constant : la probabilité d'une panne est indépendante du nombre d'heures de fonctionnement de l'équipement (pannes aléatoires). Cette période, souvent inexistante pour la mécanique, est celle de référence pour l'électronique.

Lors de la période de vieillesse, la probabilité de panne augmente avec le nombre d'heures de fonctionnement : plus l'équipement est vieux, plus il est probable d'avoir une défaillance. Ce type de comportement est caractéristique des systèmes soumis à usure ou autres détériorations progressives qui correspondent à des taux de défaillance croissants. [IEC01]

La fiabilité se limite généralement à l'étude des phases 2 et 3, on exclut les problèmes de qualité en ne tenant pas compte du déverminage qui a lieu lors de la première phase.

2.4 Temps de fonctionnement

Ce paragraphe décrit les notions de temps entre chaque transition majeure de la vie d'un système : il passe de l'état de fonctionnement à l'état de panne, puis est en réparation, avant d'être à nouveau en service.

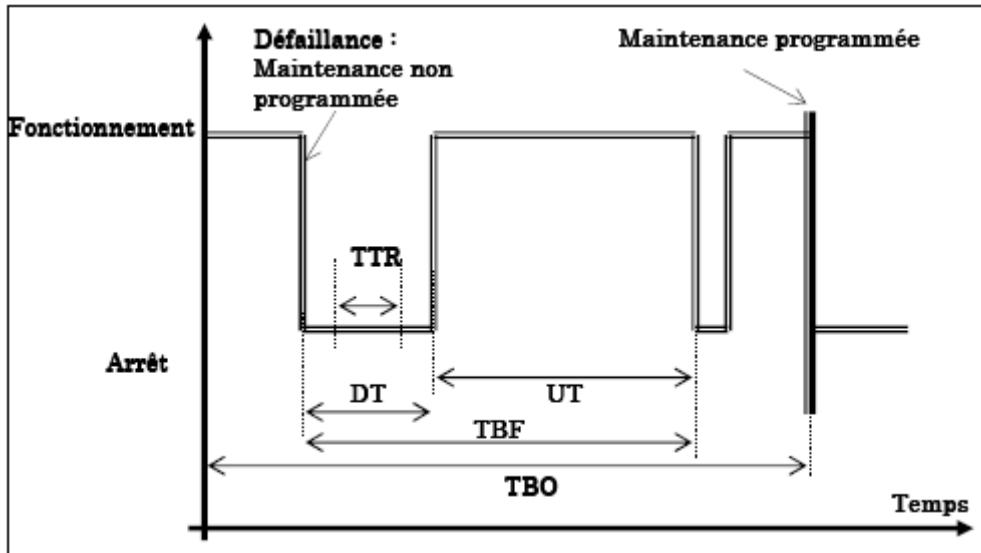


Fig. 2.5 : Temps de fonctionnement

Avec

DT : Down Time

UT : Up Time

TTR : Time to repair

TBF : Time Between Failures

TBO : Time Between Overhaul

La plupart du temps, ces notions se traduisent par des valeurs moyennes, représentatives d'une donnée d'ensemble : on parle alors de MDT, MUT, MTTR et MTBF (M pour Mean).

Le TBO n'a pas de valeur moyenne étant donné qu'il s'agit d'une durée recommandée avant entretien. [AUGE98].

2.4.1 La moyenne de temps de bon fonctionnement MTBF

Cette notion de temps moyen entre défaillances étant une valeur de base pour les calculs prévisionnels des coûts de maintenance, nous nous attarderons dessus. Interprétée de différentes manières dans la littérature [VILL99], nous chercherons à définir celle-ci de façon rigoureuse sans toutefois remettre en cause les travaux évoqués.

Le temps moyen entre panne ou moyenne des temps de bon fonctionnement MTBF (Mean Time Between Failure) est un paramètre important de la fiabilité. Il représente le temps au bout duquel se produit la défaillance, c'est l'espérance mathématique $E(t)$ des temps où interviennent les pannes.

Bien entendu, il ne faut pas perdre de vue que le MTBF est un paramètre statistique qu'il ne faut en aucun cas dissocier de la loi de fiabilité $R(t)$ à laquelle il se rapporte.

2.5 Fiabilité et maintenance préventive.

La fiabilité cherche à définir le temps avant défaillance mais, pour des raisons sécuritaires comme économiques (disponibilité, coûts de remise en état...), la maintenance des systèmes complexes ne peut se limiter à des interventions de réparation (maintenance corrective). Nous définirons ainsi dans ce paragraphe les concepts majeurs de la maintenance préventive d'un point de vue de fiabiliste. [LYON93]

2.5.1 Temps avant maintenance préventive

Lorsqu'une défaillance a des conséquences graves sur la sécurité du système, il est impératif que la probabilité que cette défaillance survienne soit très faible et pour cela, il faut entretenir les équipements de manière préventive. Avant cette maintenance préventive, un potentiel est affecté aux systèmes soumis à entretien systématique. Deux définitions sont alors à énoncer : dans la pratique, ce potentiel se traduit soit par une durée de vie (SLL : *Service Life Limit*), soit par un temps avant maintenance (TBO : *Time Between Overhaul*). La différence entre ces deux notions est que le SLL est une échéance de remplacement obligatoire alors que le TBO est une échéance de remise en état de l'équipement. [AFN82].

Si on affecte un potentiel à un équipement, cela signifie que celui-ci sera maintenu au plus tard à cette échéance. Une part de hasard peut cependant engendrer des défaillances et par conséquent des actions de maintenance non programmées.

Pour évaluer la répartition des actions de maintenance, il nous faut donc introduire des notions de temps avant dépose.

2.5.2 La moyenne de temps entre deux défaillance MTBUR

Le MTBUR (*Mean Time Between Unscheduled Removals*) est le temps moyen entre deux défaillances, il tient compte des défaillances et de la remise en état que représentent les TBO.

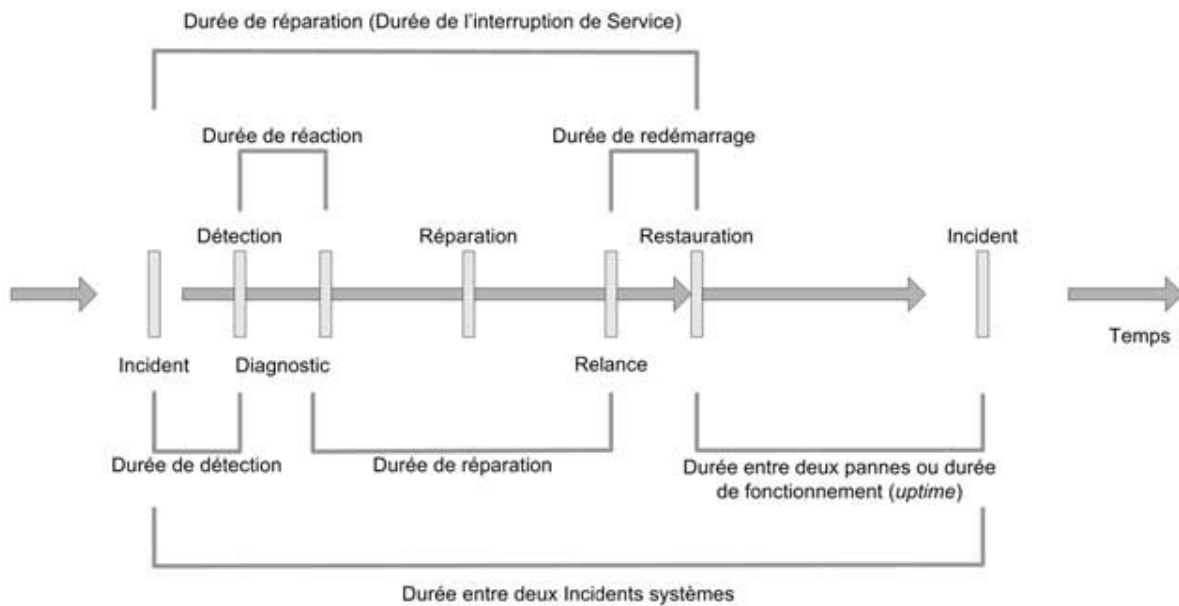


Figure 2.6 : temps entre deux défaillances

On obtient alors une fonction de fiabilité ayant l'allure définie ci-dessous :

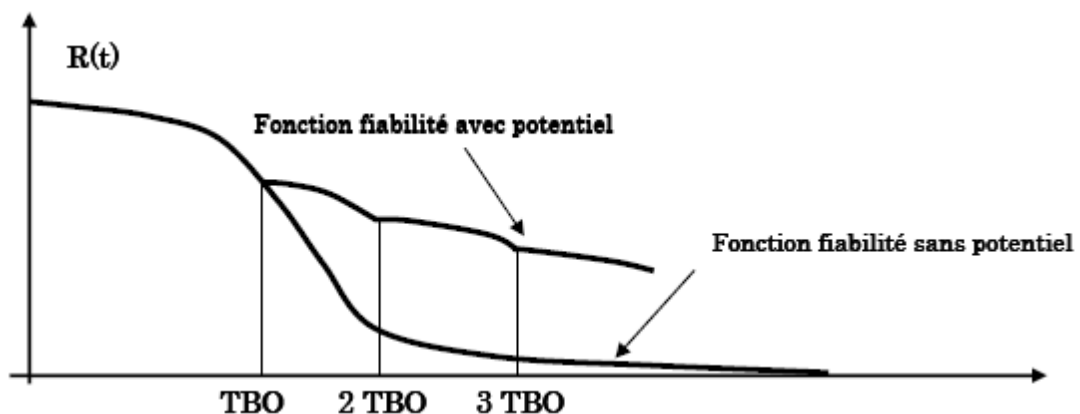


Figure 2.7 : le MTBUR [CORA75]

$$MTBUR = E(t) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt \quad [2.3]$$

$$MTBUR = \frac{1}{1 - R(TBO)} \cdot \int_0^{TBO} R(t) \cdot dt \quad [2.4]$$

Le temps moyen entre deux défaillances a pour expression :

2.5.3 La moyenne entre deux déposes MTBR

Le MTBR (*Mean Time Between Removal*) est le temps moyen entre deux déposes, que celles-ci soient dues à une défaillance ou à une fin de potentiel. Au bout d'une durée d'essais égale au potentiel, tous les équipements ont été déposés au moins une fois. On peut alors estimer le MTBR par le rapport suivant :

$$MTBR = \frac{\sum \text{Heures pour défaillance et fin de potentiel}}{\text{Nombre d'équipements}} \quad [2.5]$$

ou encore

$$MTBR = \int_0^{TBO} t \cdot f(t) \cdot dt + TBO \cdot R(TBO) \quad [2.6]$$

Ces notions de MTBR et MTBUR, ne caractérisent pas la fiabilité mais plutôt le mode opératoire de la maintenance des équipements. On peut les associer dans la relation suivante :

$$MTBUR = \frac{MTBR}{1 - R(TBO)} \quad [2.7]$$

avec R(TBO) représentant le taux d'atteinte à TBO, c'est-à-dire la proportion d'équipements ayant atteint la maintenance préventive sans tomber en panne. [LYON93]

2.6 Analyse de fiabilité en exploitation

L'analyse de fiabilité en exploitation consiste à recueillir des données de défaillance et à les exploiter de manière statistique afin de connaître la fiabilité moyenne représentée souvent par le MTBF. S'il est possible (pour certains cas) de suivre l'intégralité d'une flotte, c'est le plus souvent un échantillon qui est analysé, le choix de celui-ci pouvant déterminer la qualité de l'évaluation finale. L'analyse de fiabilité pourra se résumer par le synopsis suivant :

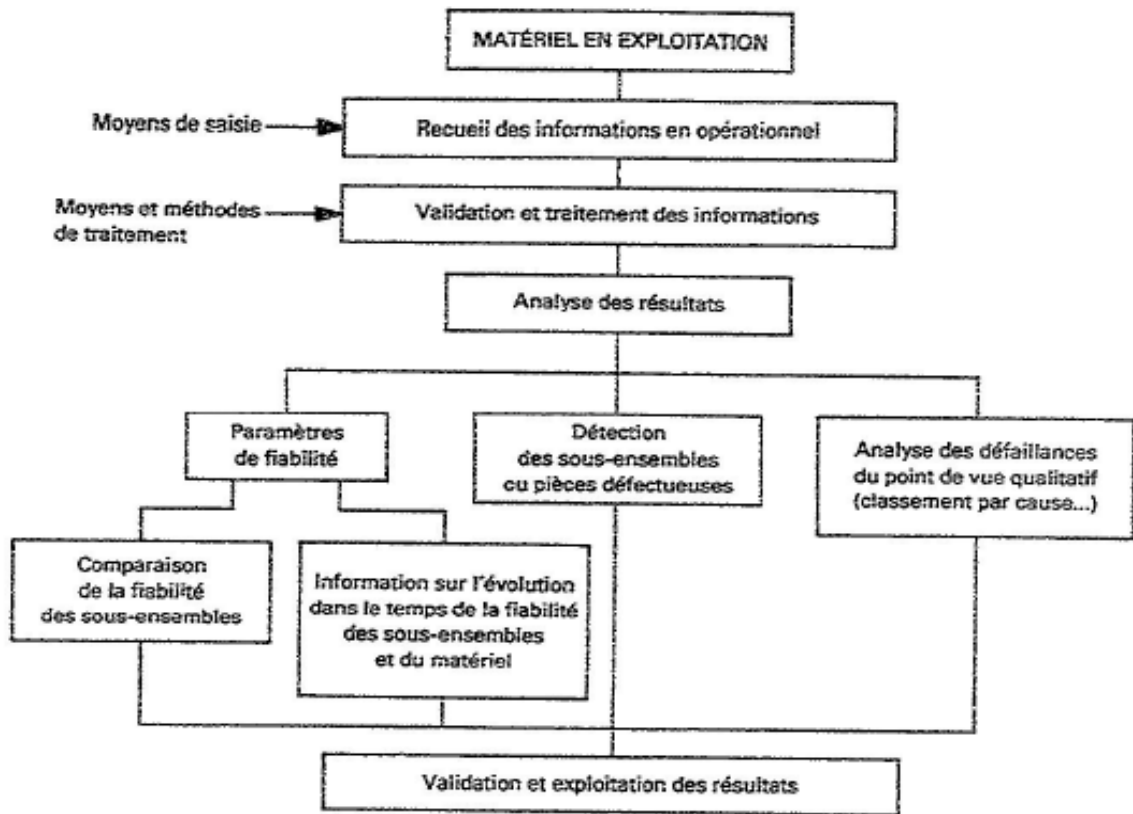


Figure 2.8 : Synopsis d'analyse de fiabilité en exploitation

Notons que la saisie des informations est une étape cruciale dans ce processus, ces données doivent permettre au minimum de caractériser la nature technique et la fréquence des incidents afin de pouvoir apprécier la fiabilité. [KRET98]

2.7 La disponibilité

Lorsqu'on étudie la fiabilité, on s'intéresse non seulement à la probabilité de panne, mais aussi au nombre de pannes et, en particulier, au temps requis pour faire les réparations. Dans cette perspective, deux nouveaux paramètres de la fiabilité deviennent notre centre d'intérêt. La disponibilité est la probabilité qu'un système soit disponible pour être utilisé à un moment donné du temps.

Cette définition est proche de celle de la fiabilité, sauf que le système demandé doit fonctionner à l'instant (t) et non sur une période de temps (0 à t).



Figure 2.9 : Variation de la disponibilité dans le temps

Lorsqu'un système est réparé de manière continue, soit par un programme d'entretien ou de maintenance, la disponibilité de l'équipement tend à devenir constante.

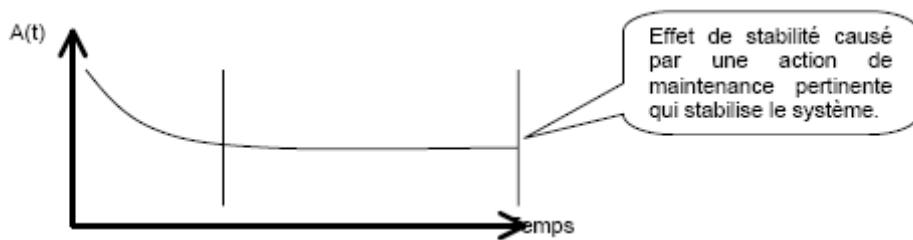


Figure 2.10 :Influence de la maintenance sur la stabilité de la disponibilité

Exemples

Effet de stabilité causé par une action de maintenance pertinente qui stabilise le système.

Équipements industriels: A = 70%

Réseau électrique urbain: A = 99,99%

Air Bag: A = 99,99%

Lorsqu'il y a trop de «9», on préfère utiliser l'indisponibilité (1-A).

Pour des systèmes réparables, une quantité fondamentale est la disponibilité. Elle est définie comme suit:

A(t) = probabilité qu'un système fonctionne de façon satisfaisante au moment t.

A(t) est donc la disponibilité ponctuelle. Cependant, dans certaines situations, il est important de connaître la disponibilité par intervalles. Elle est définie comme :

$$A^* (T) = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt \quad [2.8]$$

L'intervalle de temps entre 0 et t peut être la durée de vie utile d'un équipement ou le temps requis pour accomplir une **mission** particulière. Cette disponibilité est aussi appelée disponibilité par mission ou intrinsèque. Néanmoins, ces formules

mathématiques s'appliquent lorsqu'on ne peut pas se servir de la formule simplifiée. Elle est évaluée en prenant en compte les moyennes des temps de bon fonctionnement et les moyennes des temps de réparation, ce qui donne :

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad [2.9]$$

2.7.1 Disponibilité instantanée

Pour un système avec l'hypothèse d'un taux de défaillance λ constant et d'un taux de réparation μ constant, on montre que la disponibilité instantanée a pour expression :

$$\lambda = 1 / M.T.B.F \quad (1/h) \quad \text{et} \quad \mu = 1 / M.T.T.R \quad (1/h) \quad [2.10]$$

La disponibilité instantanée classique de l'équipement de production sera de la forme :

$$D(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad ; t \geq 0 \quad [2.11]$$

Lorsque λ et μ sont indépendants des temps et quand (t) devient grand, on constate que D(t) tend vers une valeur constante. Cette valeur est souvent dénommée disponibilité asymptotique et se note A_∞ . Elle est égale à :

$$A_\infty = \frac{1}{1 + (\lambda / \mu)} \quad [2.12]$$

c'est à dire qu'à partir d'une valeur (t₀) D(t) pratiquement ne varie plus d'où l'on peut considérer comme une valeur proche de :

$$A_\infty = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad [2.13]$$

(C'est la partie stationnaire de la disponibilité).

La détermination de $D(t)$ se fera à partir de l'estimation des paramètres de fiabilité, déduits du retour d'expérience.

Remarque

Dans le cadre de l'amélioration de la disponibilité, si on désire diminuer le taux de panne qui se définit comme $1/MTBF$, on se doit d'augmenter le **MTBF**, ce qui contribue directement à augmenter la disponibilité. D'autre part, la diminution du temps de réparation est le principal facteur d'amélioration de la disponibilité. Du point de vue économique, la disponibilité d'un équipement permet de mesurer l'efficacité du programme de maintenance. En ce qui concerne les différents programmes de maintenance, l'évaluation de la disponibilité permet de mieux orienter les efforts de maintenance. La disponibilité est le thermomètre de la maintenance basée sur la fiabilité.

2.7.2 Amélioration de la disponibilité des installations

Par définition, la disponibilité, c'est l'aptitude d'une installation à accomplir sa mission à un instant déterminé. En améliorant la disponibilité, on améliore l'efficacité, donc la productivité et les résultats. Cela dit, il existe plusieurs manières d'agir sur la disponibilité.

La première, c'est d'agir sur la disponibilité "constructeur", en prenant des matériels plus fiables, plus maintenables, et forcément plus onéreux.

La seconde consiste à agir sur la disponibilité "opérationnelle". Celle-ci est directement liée à la politique de maintenance de l'utilisateur, de l'organisation et des moyens mis en oeuvre. Par exemple, un ensemble de machines enchaînées disponibles peut s'avérer globalement indisponible si aucune coordination des interventions de réglage et de maintenance n'est effectuée. En investissant dans la maintenance, il est clair que l'industriel va améliorer la disponibilité "opérationnelle". Entre disponibilité "constructeur" et disponibilité "opérationnelle", l'industriel doit choisir quel est l'investissement le plus rentable.

La question qui se pose est du style : « *Faut-il augmenter le temps d'utilisation pour augmenter l'efficacité globale ?* ».

Le coût global optimum à rechercher impose de prendre en compte de très nombreux paramètres : le coût d'acquisition et d'installation, les coûts d'exploitation et de maintenance et bien sûr les pertes dues à l'indisponibilité des équipements.

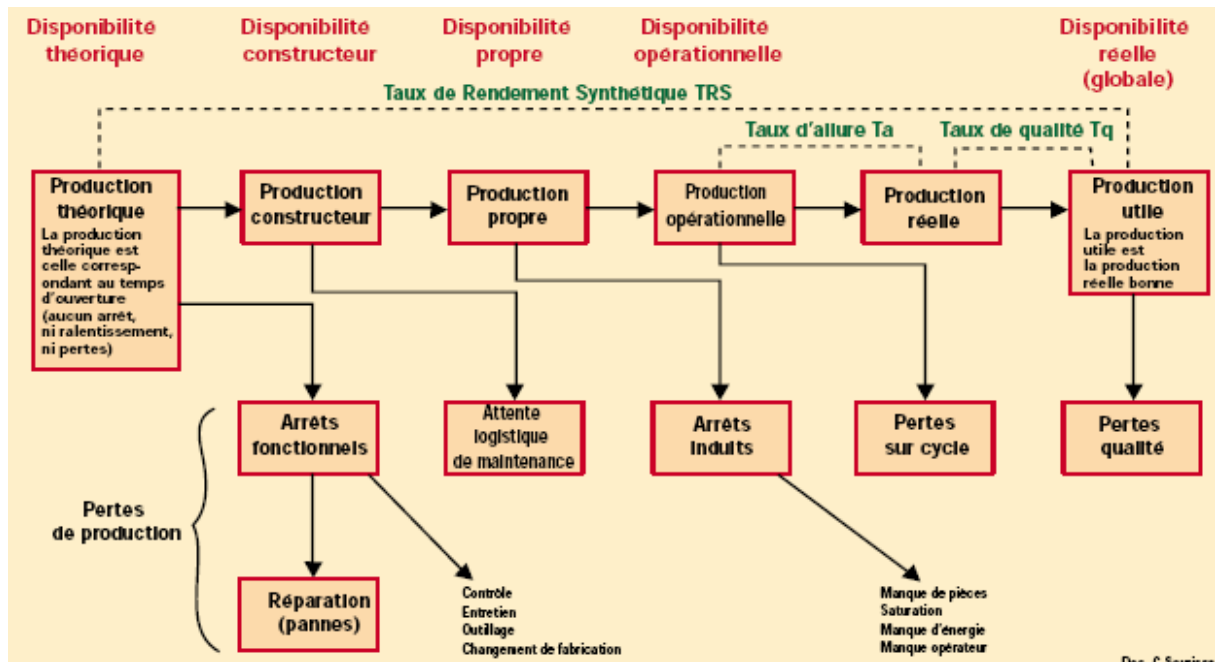


Figure 2.11 : Les différents types d'indisponibilité

2.8.3 Evaluation de la disponibilité

L'évaluation prévisionnelle de la disponibilité de production d'une installation constitue une des préoccupations majeures des industriels dans le domaine de la sûreté de fonctionnement, alors qu'elle n'est encore que peu abordée au sein de la communauté académique. L'objet de notre travail est de rappeler succinctement en quoi consiste la politique de maintenance dont il bénéficie, ainsi que les variations de sa disponibilité de production qui en résultent.

Cette dernière, qui peut être déclinée en termes de distribution de probabilité et de production moyenne espérée, apparaît comme un indicateur quantitatif pertinent des performances d'un système [BOUI91], [DEGR95].

Ce constat peut paraître paradoxal dans la mesure où ce concept constitue l'une des préoccupations prioritaires des industriels et, par là-même, devrait susciter l'intérêt des universitaires. Afin de contribuer modestement à l'éveil de cet intérêt, nous souhaitons, dans ce chapitre, rappeler en quoi consiste la notion de disponibilité de production et montrer qu'elle constitue un indicateur quantitatif pertinent qui révèle la performance globale de tout système de production. Notre démonstration expérimentale est basée sur l'étude d'un cas simple, mais représentatif de la problématique précitée [RENA99].

Cette disponibilité peut être vue comme une variable aléatoire discrète pouvant prendre un nombre généralement fini de valeurs, telles que 1 ou 0 (Figure 2.13) qui correspondraient respectivement à une production spécifiée ou à une absence de production (cas d'une centrale électrique). Ces deux niveaux de production peuvent s'exprimer en unités particulières comme le nombre de TW par unité de temps. Nous nous intéressons en fait à la distribution de probabilité de cette variable aléatoire. Ces probabilités sont le plus souvent estimées par le pourcentage de temps effectif de production à un niveau donné sur une période déterminée.

Nous nous proposons à présent de décrire l'approche mise en oeuvre pour apprécier la régularité de production d'une centrale électrique par le biais de l'indicateur quantitatif constitué par la valeur moyenne espérée de la disponibilité de production de cette centrale, elle-même déduite de sa distribution de probabilité (Figure 2.12).

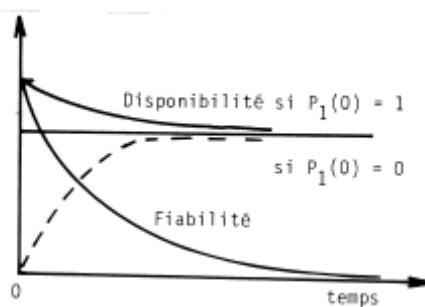


Figure 2.12 : Disponibilité

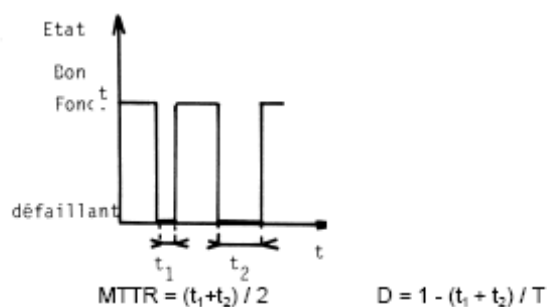


Figure 2.13 : Répartition des MTBF et MTTR

L'efficacité économique d'un procédé industriel dépendant de leviers tels que la **fiabilité**, **la disponibilité**, **la maintenabilité** et **la sécurité** ; il est impératif de mettre en oeuvre globalement ou séparément des procédures itératives pendant les trois premières phases pour être sûr que les différents points du cahier des charges seront satisfaits.

La figure 2.14 représente un exemple de procédure globale et itérative pour la définition d'un système où les objectifs de **fiabilité**, **disponibilité**, **maintenance**, **maintenabilité** et **logistique** ont été pris en compte. Cette procédure utilise deux étapes :

- la première étape est consacrée aux spécifications générales, compte tenu des objectifs du cahier des charges et définit, de façon itérative, les diverses allocations au niveau des systèmes ;
- la seconde étape, également itérative, conduit aux programmes initiaux de maintenance et de soutien logistique.

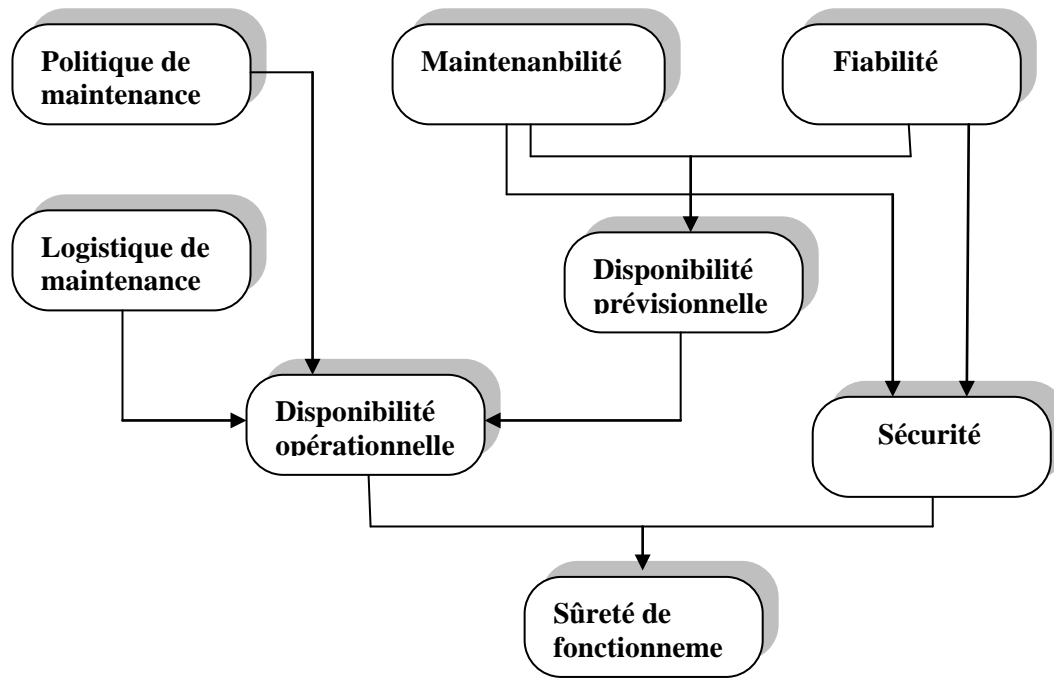


Figure 2.14 : Relations entre fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité

On remarque qu’il est indispensable de disposer d’un retour d’expérience en provenances d’industries similaires pour parfaire les choix.

Le déroulement pratique de cette procédure très globale nécessite un travail d’équipe plus détaillé faisant appel à des méthodes structurées d’analyse et de documentation

- facteurs techniques : matériels et produits manipulés (incluant les problèmes de conception, de fabrication, d’assurance qualité, de conduite et de maintenance) ;
- facteurs humains : qualité de la formation, ergonomie, procédures ;
- facteurs environnementaux : risques naturels, milieux ambiants (poussières, gaz, électricité statique...).

Les études de sécurité, où la maintenance joue un rôle non négligeable dans la mesure où de nombreux accidents sont liés à des défaillances techniques ou humaines, couvrent un spectre technique étendu. Les méthodes utilisées en sécurité doivent en particulier :

- identifier les modes de fonctionnement anormaux pouvant conduire à une situation dangereuse ;
- analyser la combinaison et l’enchaînement d’événements peu probables, pris isolément, qui conduisent à des accidents. L’expérience montre, en effet, que de

nombreuses catastrophes ont été le résultat de séquences de défaillances mineures (techniques ou humaines) ;

- évaluer la probabilité d'occurrence d'un accident et lui assigner une gravité sur une échelle appropriée pour juger si le risque est acceptable économiquement ou écologiquement compte tenu des enjeux de la mission ;
- maintenir le risque à son niveau acceptable grâce, par exemple, à la maîtrise de la fiabilité des matériels obtenue par des politiques efficaces de maintenance.

La maîtrise des risques représente une discipline à part entière et fait l'objet d'ouvrages spécialisés et de techniques spécifiques des industries concernées (transport, chimie, nucléaire...).

La figure 2.14 résume les liens entre fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité.

2.9 Analyse de la disponibilité des installations de production électrique :

Bien plus que tout secteur industriel, les industries de la production électrique représentent des enjeux économiques et stratégiques considérables. Cette industrie se répartit sur l'ensemble du territoire national et son objectif principal est de satisfaire à une demande de plus en plus forte du consommateur .Ainsi, l'augmentation de la productivité à travers l'amélioration du taux d'utilisation des capacités installées est l'un des vecteurs principaux du succès et de la pérennité de ces entreprises.

Dans le contexte ci-dessus la centrale électrique de Annaba, a été prise comme lieu d'application de notre étude. Nous essayons, à travers cette application, d'illustrer la mise en œuvre d'une politique de maintenance prédictive.

2.9.1 Présentation de la centrale thermique d'Annaba :

Mise en service en octobre 1951, la centrale thermique d'Annaba était une des plus importantes centrales thermiques de l'Afrique du nord et demeure une des vieilles centrales que compte le parc de production du groupe Sonelgaz.

Sa puissance installée comporte :

Un groupe turbo-alternateur vapeur de 55 MW (GTA.3) :

Couplé le 01.06.73, le groupe est constitué de :

- Une chaudière de 230 t/h à 100 Kg/Cm², fonctionnant au gaz naturel.
- Une turbine de 55MW, 90 Kg/Cm² et 535°C à 8 soutirages.

- Un alternateur de 68,750 MVA et 3780 ampères $\text{Cos } \varphi$ 0,8 refroidi à l'hydrogène.
- Un transformateur principal de 70 MVA, 10.5/60 KV.

Un groupe turboalternateur vapeur de 75 MW (GTA.4) :**Trois groupes turboalternateurs à gaz 3 X 15 MW**

Couplé le 07.07.72, le groupe est constitué de :

Une chaudière à resurchauffe de 245t/h, 146 bars, Combustible de base :

gaz naturel,

Une turbine de 75 MW à 127 bars au corps H.P. et 36,5 bars à corps M.P
température 538°C à 6 soutirages.

- Un alternateur de 93,750 MVA, 13,8 KV, 3920 ampères et $\text{Cos } \varphi$ 0,8 avec refroidissement à l'hydrogène.
- Un transformateur principal de 93,750 MVA, 13,8 / 60 KV.

*** Trois groupe turboalternateurs à gaz de 3 X 15 MW ;**

TG1, TG2 et TG3

Matériel commun aux deux blocs (TV) : composé de :

- Une station d'air comprimé.
- Un réservoir de 3000 m³ de FOD (NAFTAL).
- Une station de filtrage de l'eau de mer.
- Deux chaînes de déminéralisation de 12 t/h chacune.
- Une réserve d'eau brute de 5375 m³.
- Un réseau incendie.
- Une station de floculation de 300 m³.
- Une réserve d'eau déminéralisée de 6000 m³.

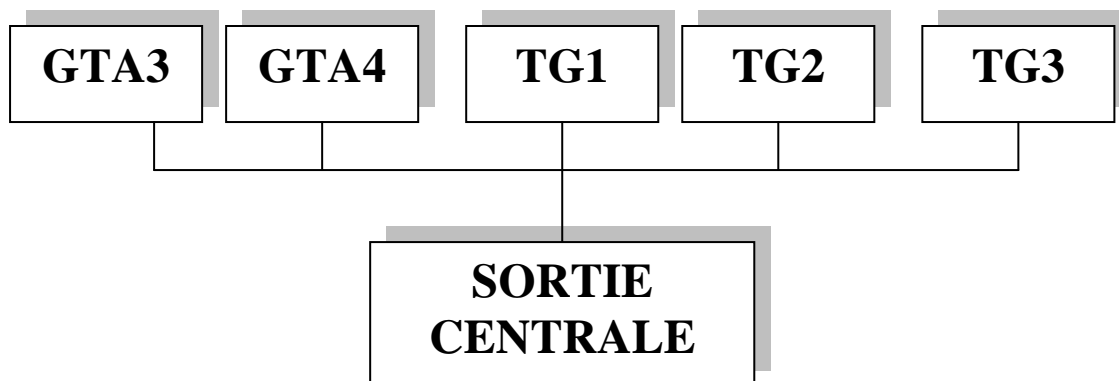


Figure 2.15 : Schéma de principe de la centrale

1.2.1. Schéma d'un cycle thermique vapeur :

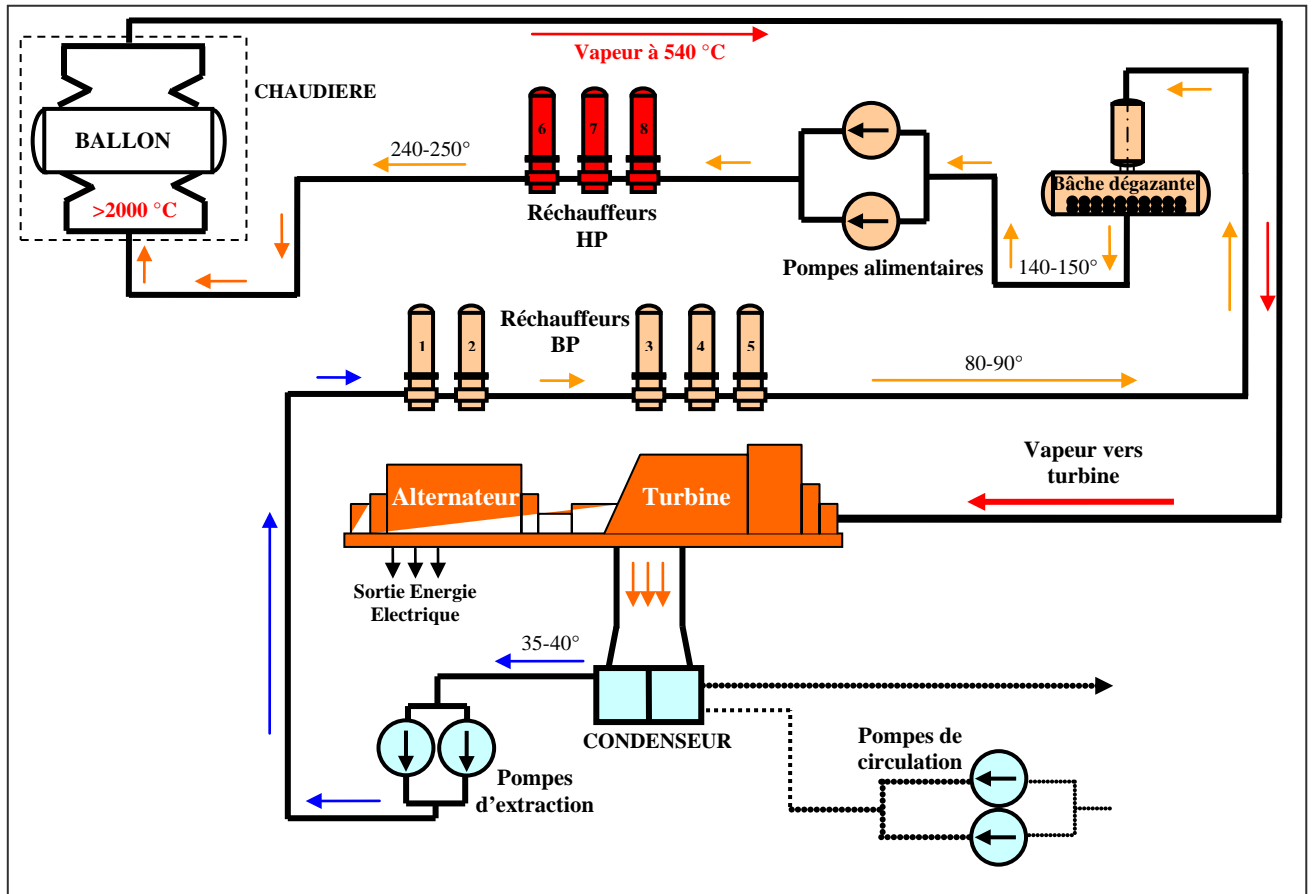


Figure 2.16 : Schéma du cycle vapeur de la centrale thermique

Disponibilité de la centrale %

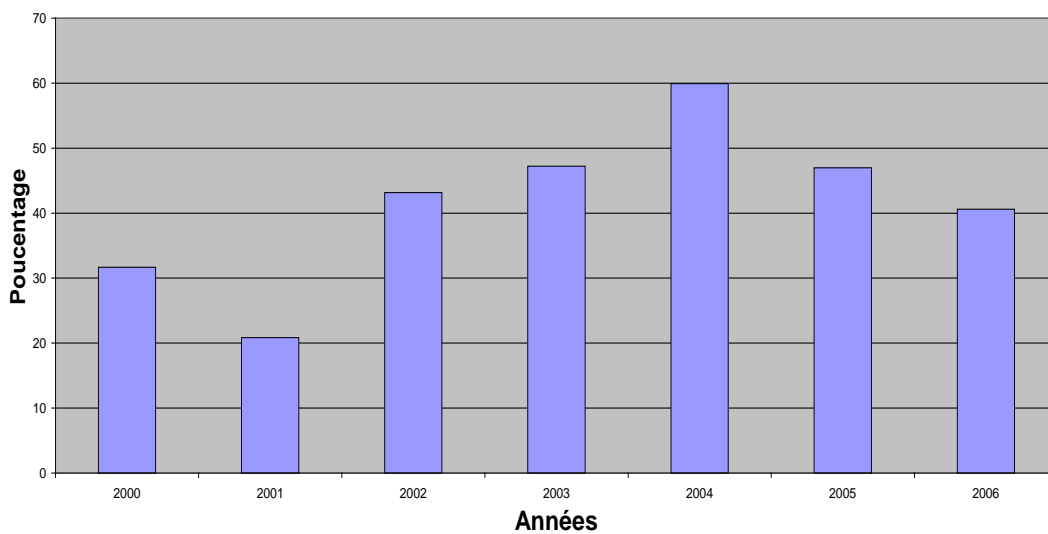


Figure 2.17 Disponibilité de la centrale durant les sept dernières années

La figure 2.17 présente l'évolution de la disponibilité mesurée durant les septes dernières années. Les mesures sont affichées en fonction de leurs périodes. Nous constatons les fortes variations de la disponibilité, cela est due aux différents gros travaux que subissent les groupes TG2 et TG3.

La production totale d'énergie la plus importantes réalisée par l'ensemble des groupes de la centrale à atteint les 831.794GWh et cela durant l'année 2004 avec un taux d'évolution 2004/2003 de 1,21.

Cette hausse de production par rapport aux années précédentes est due essentiellement à la remise en exploitation du GTA3 et de la TG 1 après la rénovation de la chaudière pour le premier et le remplacement du rotor alternateur pour le second.

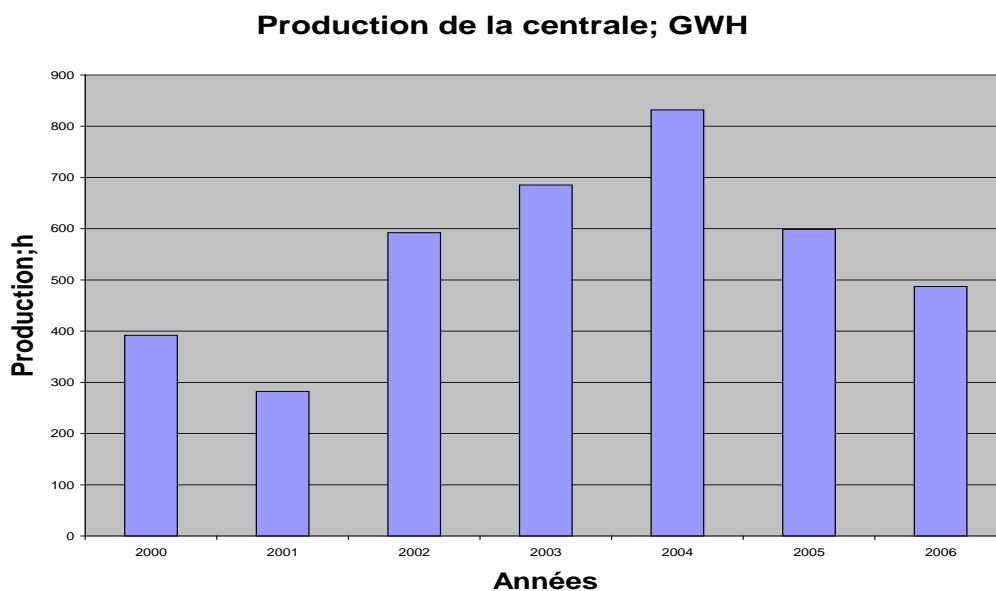


Figure 2.18 : Production de la centrale ,GWH

La production d'énergie TV pour l'année 2004 a augmenté de 1,27% par rapport à l'année précédente. Elle est liée essentiellement à la remise en service du GTA3 après rénovation de la chaudière. Par contre la production d'énergie du GTA 4 qui connue une grande amélioration après la rénovation de la chaudière en 2001 a diminué de 27,3 % à cause des déclenchements fréquents et la limitation de charge survenus pendant l'année 2004.

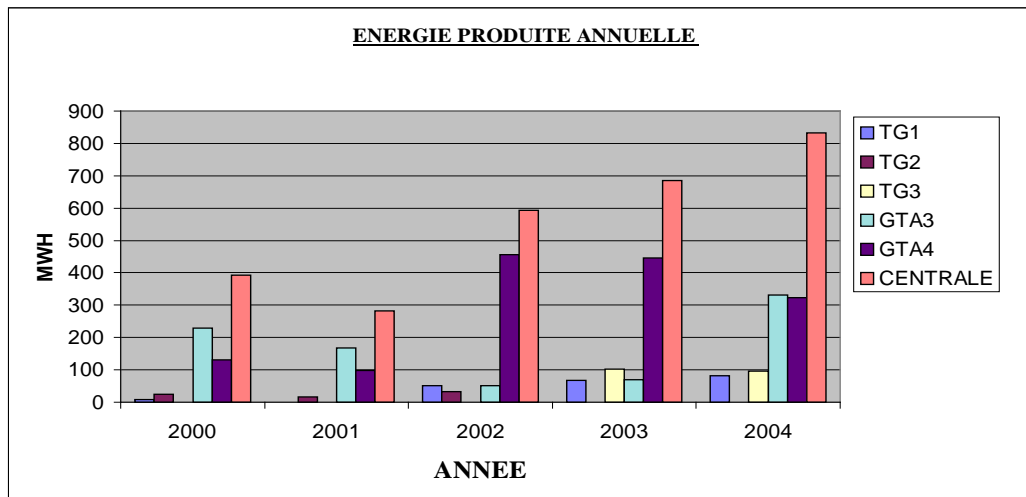


Figure 2.19 : Production annuelle d'énergie par secteur

En remarque sur cette figure que la plus part de la production de la centrale est obtenu à partir des groupes GTA3 et GTA4, c'est pour cette raison que la disponibilité totale de la centrale ne dépasse pas les 60% dans les meilleurs conditions.

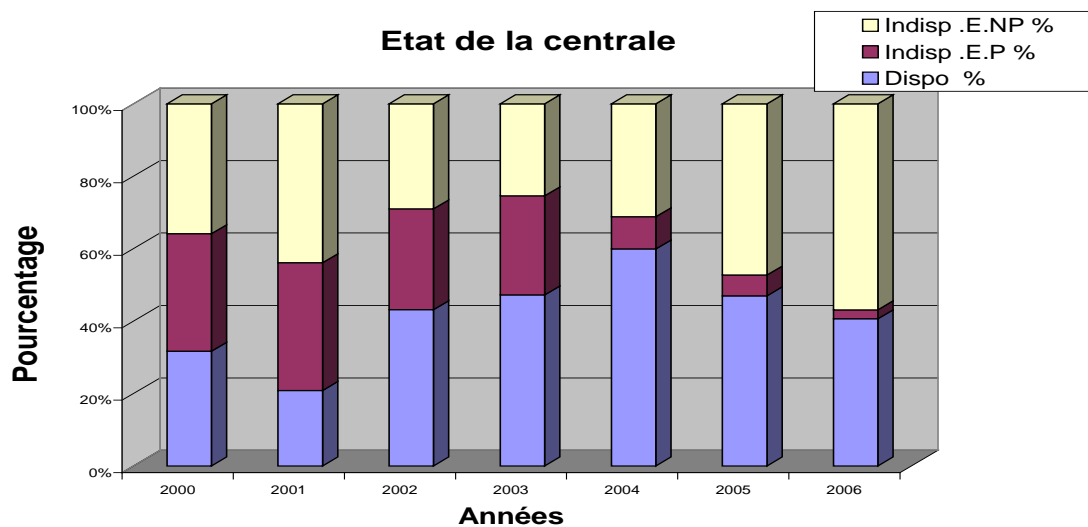


Figure 2.20 : Indisponibilité de la centrale

La figure 2.20 montre l'ampleur de l'indisponibilité de la centrale à cause des interventions non programmées. Cette augmentation est dû à une faible prise en charge des installations pour maintenance programmée, tel que le préventif systématique et conditionnelle.

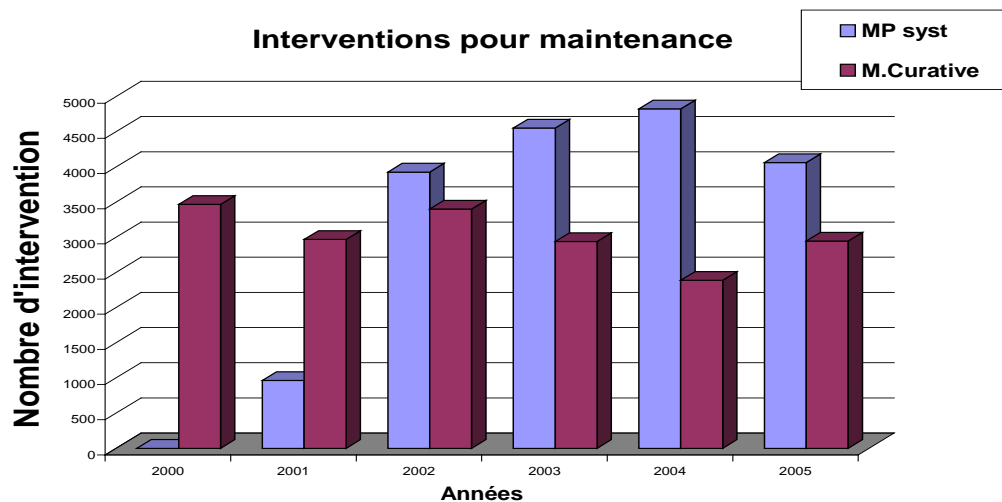


Figure 2.21 : Quantité d'intervention pour maintenance

Nous constatons sur la figure 2.21 que la maintenance curative est toujours importante en nombre et en temps quelque soit les améliorations faites dans le domaine de la maintenance préventive systématique. Ce qui oblige les responsables de l'entreprise de penser sérieusement à d'autres méthodes plus efficaces et moins coûteuses, tel que la maintenance prédictive basée sur la surveillance continue des installations et en particulier les parties stratégiques de la centrale.

2.10 Enjeux de la maintenance efficace

Les enjeux d'un entretien efficace sont de répartir les ressources disponibles vers des tâches ou des activités qui ont des retombées directes sur la rentabilité des installations. À ce titre, on tendra en première étape vers une diminution des activités d'entretien correctif au profit de l'entretien préventif. Pour cela, on suppose que les projets d'aménagements ainsi que les améliorations prévues demeurent les mêmes au niveau de l'attribution des ressources et des budgets, puis en deuxième étape réduire les activités du correctif et du préventif au profit du conditionnel prédictif. Les graphiques suivants illustrent donc ce but qu'il faut viser lors de l'implantation d'un programme de maintenance prédictive.

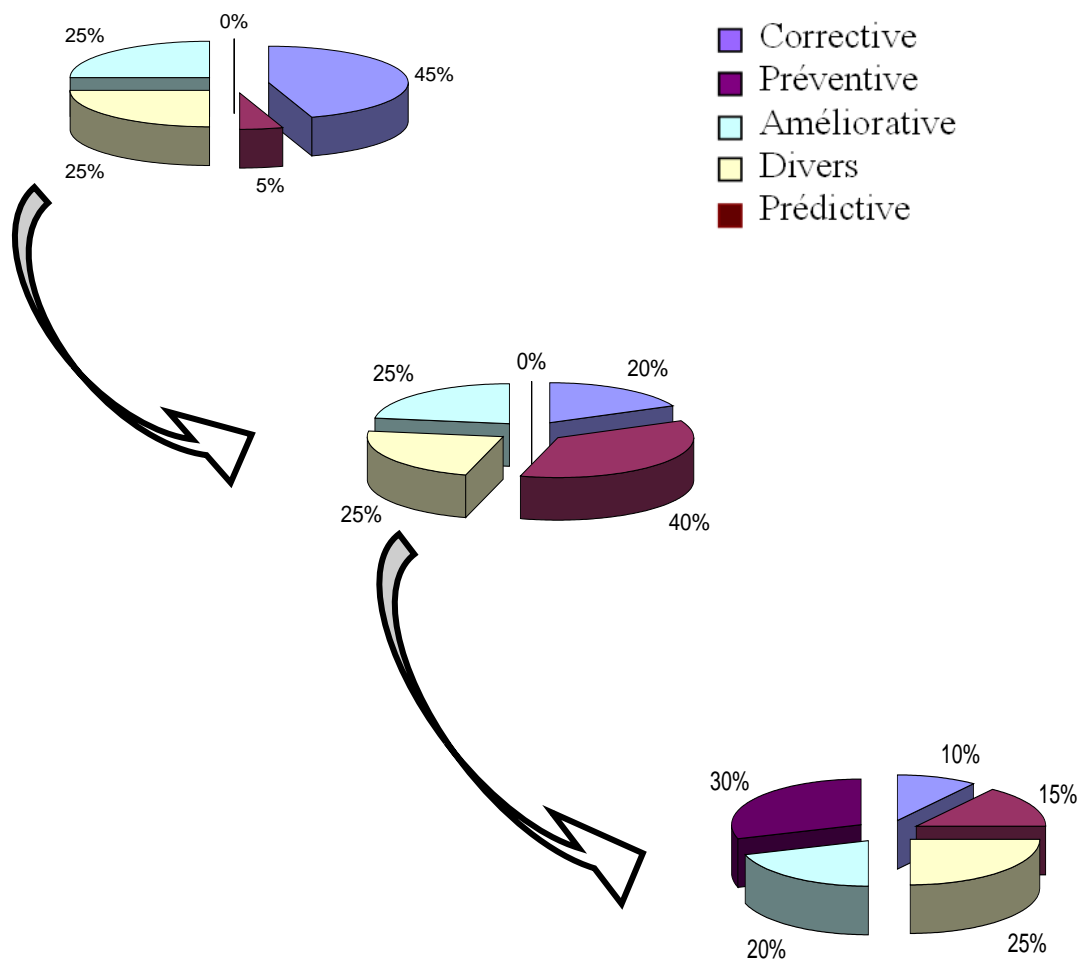


Figure 2.22 : Objectifs d’implantation d’un programme de maintenance prédictive

C'est un objectif réaliste que l'on peut espérer atteindre après seulement quelques années d'implantation. Les avantages et les retombées possibles sont des plus incitatifs.

L'entretien industriel est avant tout un outil de développement et d'adaptation technologique. Il faut donc percevoir ce service comme un investissement dans la fiabilité et la disponibilité des équipements de production. Et qui dit investissement, dit retombées et gains anticipés dans un délai appréciable. Voici donc des exemples d'économies ou de gains directs que l'on peut espérer obtenir suite à la mise en place d'un programme de maintenance prédictive:

- une augmentation de 15% 20% de la productivité du personnel d'entretien;
- une réduction de 25% à 50% en termes de temps d'arrêt imprévus;

- une diminution de 20% à 40 % du temps supplémentaire (10% même la première année);
- une réduction de 10% à 25% sur les coûts de pièces de rechange;
- une réduction de près de 25% de l'inventaire de pièces de rechange;
- une réduction de 2,5% à 5% sur les coûts d'énergie pour les équipements.

Conclusion

L'utilisation de l'électricité est devenue à ce point banale que l'on finit par ignorer ses dangers et considérer sa présence comme quelque chose de naturel. Cependant, toutes ces apparences sont trompeuses et le maintien de la continuité de service nécessite un effort de la part des exploitants des systèmes. Dans le cas des réseaux, cet effort se répartit entre l'entretien permanent des composants (pylônes, câbles électriques, transformateurs, ...etc) et des unités de production (centrales électriques).

Le maillon faible est la machine électrique, car sa panne paralyse immédiatement la production et entraîne une perte sèche très importante.

Une maintenance dite « prédictive » doit donc être assurée afin de prévenir à temps les défauts susceptibles de se produire dans les machines.

Bien évidemment, le meilleur moyen d'assurer un diagnostic correct de la machine ne consiste pas à « décortiquer » la machine à intervalles réguliers. Il consiste à étudier certaines grandeurs caractéristiques du type de défaut rencontré (niveau vibratoire, température, état du lubrifiant...).

Cependant l'analyse et l'évaluation réalistes de la capacité de production de systèmes industriels nécessitent des outils flexibles et puissants. En nous basant sur les résultats traités dans ce chapitre, et surtout sur des études de cas industriels de la centrale électrique, nous confirmons qu'il est primordial de changer complètement la politique de maintenance appliquer en allant du préventif traditionnel vers le prédictive et le proactive si vraiment nous avons besoin d'améliorer la productivité des installations de production. La maintenance prédictive a les qualités requises pour satisfaire ce double besoin, dans l'attente de l'émergence d'outils encore plus évolués, basés sur la fiabilité des installations, ce qu'on va détaillé dans le chapitre 3.

Chapitre 3

Maintenance prédictive

1. Introduction

Les pannes imprévues sont quelques fois très coûteuse. La perte de production pendant les réparations engendre un manque à gagner qui peut affecter les bénéfices de l'entreprise. Si l'on y ajoute les problèmes de sécurité insuffisante pour le personnel, la qualité de production amoindrie et la perte éventuelle de réputation pour l'entreprise, il devient évident que de telles pannes ne doivent pas être tolérées.

Pour régler ce problème, il faut trouver une nouvelle approche maintenance dans les ateliers. Les méthodes traditionnelles de maintenance se contentent de faire fonctionner les machines jusqu'à rupture (curative), ou bien d'effectuer la maintenance à intervalles fixes (préventive).

La première approche concerne les machines peu coûteuses et dupliquées, lorsqu'une perte de production peut être tolérée sur une unité. La seconde méthode, appelée maintenance préventive, présente le risque que des machines en parfaites état de marche soit arrêt inutilement, soit des machines sur le point de tomber en panne soient inconsciemment laissées sans surveillance.

L'approche moderne consiste à mesurer l'état d'une machine pendant son fonctionnement afin de n'intervenir que lorsque les paramètres l'indiquent. Cette méthode est appelée maintenance conditionnelle (prédictive).

Pour que la maintenance prédictive soit efficace, il faut des mesures précises et fiables de l'état des machines. Un certain nombre de variables des machines peuvent être utilisées: la température, la pression d'huile. Cependant, l'expérience a montré que le paramètre le plus fiable qui donne le plus précocement et de la meilleure façon l'état de détérioration d'une machine tournante est la vibration.

Toutes les machines vibrent et, au fur et à mesure que l'état de la machines se détériore (déséquilibre d'un arbre, défaut de roulement ou de boîte de vitesse) le niveau de vibration augmente.

En mesurant et en surveillant le niveau de vibration produit par une machine, on obtient un indicateur idéal sur son état.

Si l'augmentation de vibration de la machine permet de détecter un défaut, l'analyse des caractéristiques de vibration de la machine permet d'en identifier la cause. On peut ensuite en déduire avec précision le délai avant qu'il ne devienne critique

3.1 Historique :

Dans les années 1960, il était fréquent d'attendre qu'un équipement tombe en panne pour le réparer – c'était une pratique courante consistant à "réagir à chaud". En règle générale, la maintenance était considérée par la direction comme un coût nécessaire à accepter pour faire des affaires.

Au fil des années, cette façon de travailler – et de voir les choses – a commencé à évoluer. Dans les années 1970, la plupart des usines disposaient d'un programme de maintenance préventive plus ou moins sérieux. Dans les années 1980, les sites les mieux gérés avaient déjà recours à des stratégies de maintenance prédictive et dans les années 1990 sont apparus des outils et des logiciels de diagnostic qui ont permis au personnel de maintenance de disposer d'informations sur l'état des machines, ce qui aurait paru inimaginable quelques années auparavant. [GERM98]

Aujourd'hui, une optimisation de la rentabilité d'une usine et de ses équipements implique à l'évidence le passage d'une maintenance traditionnelle – basée sur la réparation –, réactive et fonctionnelle à la fois, à une maintenance proactive (ou basée sur la fiabilité et le risque), pleinement intégrée dans les activités générales de l'usine.

Cette évolution du prédictif au proactif avec une intégration des systèmes d'aide à la décision industrielle permet souvent de faire passer la maintenance d'un centre de coût à un centre de profit.

3.2 Evolution de la maintenance :

3.2.1 de la maintenance réactive à la maintenance proactive

La mise en place d'un programme de maintenance axée sur la fiabilité est un processus continu qui commence par une analyse de vos pratiques en matière de fiabilité et de maintenance dans l'optique du passage d'une maintenance réactive à une maintenance proactive et se poursuit par un ajustement de ces pratiques afin d'optimiser leur efficacité.

En théorie, ce processus s'achève avec l'obtention d'un rendement maximal mais dans la pratique, il n'a pas de fin. Un programme réussi est de nature dynamique ; il intègre et applique le mélange le plus efficace de maintenance réactive, préventive, prédictive et proactive ainsi que des mesures permettant la mise en oeuvre d'une fiabilité pilotée par l'opérateur [DUFF98].

L'objectif est bien sûr d'optimiser la rentabilité des machines en passant dans la mesure du possible d'interventions traditionnellement correctives à une approche proactive et pleinement intégrée de la fiabilité.

Un large éventail de scénarii est à envisager : ils varient selon l'état de notre programme de maintenance et nos objectifs commerciaux.

Les étapes ci-dessous présente un éventail des pratiques de maintenance. En règle générale, les meilleurs résultats seront obtenus en composant un mélange évolutif établi en fonction des activités de l'usine.

A- Efficacité minimale**B- Réaction/Correction**

Dans ce cas, l'approche consiste à attendre une rupture de la pièce pour entreprendre une réparation ; des arrêts non planifiés surviennent quand la machine tombe en panne

C- Maintenance préventive (PM)

Les arrêts planifiés et non planifiés sont organisés de façon à permettre une révision des équipements à intervalles prédéterminés ; les efforts de maintenance ne se fondent pas sur une évaluation de l'état de la machine en cours de fonctionnement

D- Maintenance prédictive (PdM)

L'état des machines est évalué à l'aide des techniques de maintenance conditionnelle ; les arrêts machine sont planifiés en fonction des problèmes identifiés par des équipements de contrôle des conditions de fonctionnement par les vibrations ; les arrêts non planifiés sont considérablement réduits.

E- Maintenance proactive (PRM)

La maintenance proactive est utilisée pour repérer les causes des problèmes survenant sur les machines ou les processus ; les machines fonctionnent presque sans subir d'arrêt machine non planifié ; le temps moyen entre les défaillances (MTBF) des machines et des composants est considérablement allongé.

F- Fiabilité pilotée par l'opérateur (ODR)

Les opérateurs de première ligne sont responsables de leurs machines. Ils identifient, décrivent et transmettent à l'équipe de l'usine toutes les informations utiles afin de maintenir les machines en parfait état de marche

G- Efficacité maximale

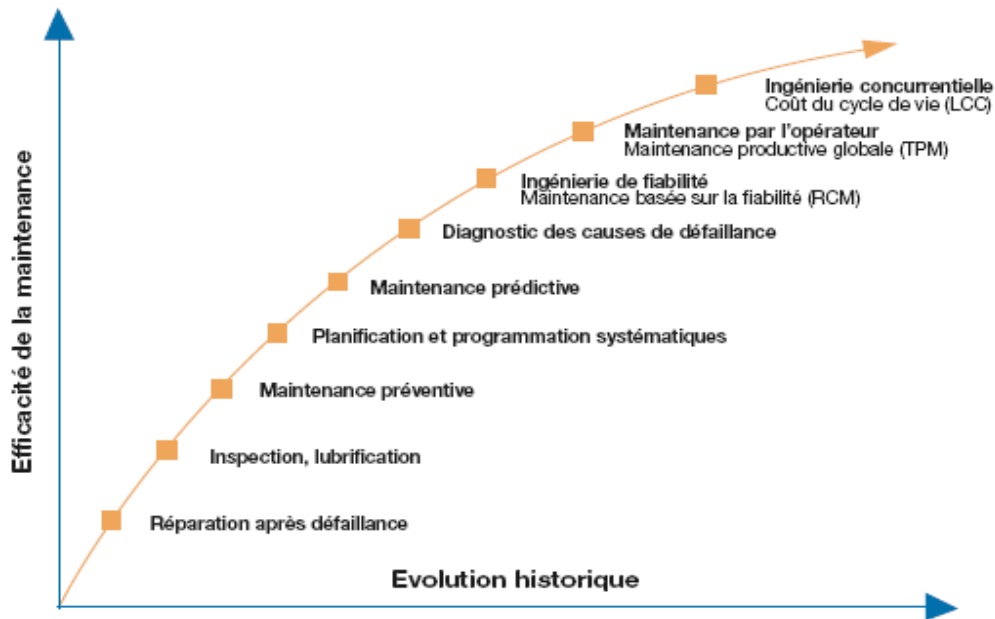


Figure 3.1: Evolution historique de la maintenance

Il existe quatre phases successives à traverser pour atteindre un rendement optimal. Dans un monde idéal, toutes les usines auraient la possibilité d'appliquer les dernières technologies pour accroître la fiabilité des machines. En réalité, cela ne se passe pas ainsi. Pourquoi ?

Parce que de nombreuses techniques et technologies ne sont applicables que dans les usines qui ont déjà atteint un certain niveau de maturité en matière de maintenance et qui disposent des processus et de la culture nécessaires [MORE01] .

Tableau 3.1 : Eléments moteurs d’une entreprise

CARACTERISTIQUE DU PROGRAMME	STABILISATION		OPTIMISATION	
MATURITE DE LA MAINTENANCE	Réagir à chaud	Entretien	Améliorer	Innover
ELEMENT MOTEUR	Pannes	Eviter les défaillances	Temps de service	croissance
GRATIFICATION	Les héros des heures supplémentaires	Sans surprise	Avantage concurrentiel	Excellence Optimisation du rendement
COMPORTEMENT	Réponse	Planification	Organisation et discipline	Apprentissage structuré

Certaines pratiques, idéales pour les sites qui se trouvent encore aux premiers stades de maturité, apporteront peu de valeur ajoutée supplémentaire aux usines se situant aux stades avancés de l’optimisation du rendement Le graphique ci-dessus illustre les éléments moteurs, les gratifications et les comportements rencontrés par une usine qui traverse les quatre phases de maturité de la maintenance : réagir à chaud, entretenir, améliorer et innover. La première étape vers un objectif d’amélioration du rendement des investissements de production consiste à faire un bilan exact de la situation de votre usine avant d’élaborer et de mettre en œuvre un programme qui permettra d’atteindre un niveau optimal de maturité de la maintenance

3.2.2 Maintenance prédictive

3.2.2.1 Définition

Le terme de maintenance prédictive n’est pas normalisé. On le trouve souvent employé pour caractériser les prévisions de maintenance en fonction de la tendance d’évolution du dysfonctionnement détecté et de l’estimation du temps de fonctionnement correct qui subsiste.

Les conditions de mise en place de la maintenance prédictive sont sur un équipement considéré :

- l’équipement présente une dégradation progressive et détectable,

- cette dégradation peut être saisie et mesurée à l'aide d'un paramètre,
- l'appareillage qui permet cette mesure est fiable et les résultats peuvent être interprétés par un personnel qualifié,
- la valeur initiale et la valeur limite du paramètre peuvent être fixées,
- la limite fixée correspond bien à un seuil significatif pour la perte de fonction de l'équipement (ou sa dangerosité),
- la périodicité de mesure est définie et elle est suffisante pour saisir toutes les évolutions du paramètre,

La surveillance du paramètre représentatif pourra se faire, suivant l'importance de l'équipement, d'une manière périodique (observation, relevés, rondes...) ou d'une manière continue à l'aide de capteurs fixés sur l'équipement [ROCC97].

3.2.2.2 Avantages par rapport à la maintenance corrective :

- moins de défaillances imprévues, donc moins d'arrêts de production,
- planification possible des interventions donc meilleure préparation, meilleure qualité du travail, moindre coût,
- meilleures relations entre Service production et Service maintenance,
- possibilité de mieux gérer le stock de pièces de rechange.

3.2.2.3 Avantages par rapport à la maintenance préventive systématique :

- utilisation des équipements au maximum de leurs possibilités,
- diminution des défaillances et donc de la maintenance corrective résiduelle,
- diminution des stocks de pièces de rechange,
- meilleure surveillance des équipements suivis d'où corrections possibles des erreurs de conduite ou des petites anomalies qui peuvent générer des défaillances plus pénalisantes,
- amélioration de la sécurité par détection en temps voulu, d'anomalies (échauffements par exemple) pouvant évoluer vers des accidents graves.

3.2.2.4 Limites de la maintenance prédictive :

- nécessité de détecter les anomalies et de suivre leur évolution par la mesure d'un paramètre significatif d'où la notion d'accessibilité du matériel, du point de mesure, ...

- le coût des équipements de mesure,
- la formation poussée que certaines techniques exigent du personnel (études de vibrations en particulier),

3.3 Techniques de surveillance utilisées en maintenance prédictive

3.3.1 Introduction

Surveiller une machine nécessite de procéder au choix préalable d'un certain nombre d'indicateurs. Un indicateur de surveillance est issu d'un paramètre ou d'une grandeur dont l'acquisition est faite le plus souvent possible en fonctionnement. Un indicateur doit, par définition, caractériser l'état ou les performances d'une machine. Son évolution dans le temps doit être significative de l'apparition ou de l'aggravation d'un défaut. La température d'un palier, le bruit, le spectre ou la forme du courant d'alimentation d'un moteur est autant d'indicateurs susceptibles de représenter l'état d'une machine et d'en suivre l'évolution dans le temps.

Turbines, pompes, moteurs, compresseurs, alternateurs, centrifugeuses, ventilateurs... toutes ces machines, que l'on dit "tournantes", ont un point commun : elles comprennent des organes en rotation. Suivant les cas, il peut s'agir de structures relativement simples, constituées d'un seul arbre en rotation à travers un ou plusieurs roulements, ou de machines plus complexes composées de plusieurs arbres tournant à des vitesses de rotation différentes... Mais ce qui caractérise avant tout ces machines, c'est qu'elles sont composées d'organes fragiles (roulements, engrenages, coussinets...) soumis à des contraintes mécaniques importantes et à des environnements industriels difficiles.

Les sources de défaillance sont donc multiples : l'écaillage d'un roulement, la rupture d'une dent d'un engrenage, le désalignement d'un des axes, etc. Lorsque la machine joue un rôle vital dans la production (c'est le cas des turbo-alternateurs), ces défauts peuvent s'avérer lourds de conséquences.

Pour éviter des arrêts de production imprévus et les pertes économiques qui en découlent, il faut surveiller en permanence ces équipements et "traquer" tous les signes précurseurs de défauts avant qu'il ne soit trop tard. Pour cela, il existe une grande variété de techniques.

3.3.2 la thermographie infrarouge

3.3.2.1 Définitions

Un défaut sur un équipement se traduit toujours par une élévation de température, cette élévation, si elle ne se voit pas dans la visible, apparaît instantanément dans l'infrarouge, ainsi, la thermographie infrarouge est une technologie efficace de maintenance prédictive pour localiser les problèmes rapidement, en toute sécurité.

Avec la thermographie infrarouge on peut visualiser les défauts avant qu'une panne sur les installations ne se produise et qu'elle ait des conséquences fâcheuses : perturbation ou arrêt de la production jusqu'à un début d'un incendie dans le pire des cas.

3.3.2.2 Principe de base

La totalité de l'énergie émise par une surface et la distribution spectrale de cette énergie varie avec la température, en général aux basses températures le maximum de radiations est dans le moyen infrarouge (2 à 20 μ).

Au fur et à mesure que la température s'élève, l'énergie émise s'élève et le gros de l'énergie va vers des longueurs d'ondes de plus en plus courtes.

3.3.2.3 Généralités sur l'infrarouge

On parle d'ultraviolet, fréquence au delà du violet, alors que la longueur d'onde du violet est plus courte. On parle aussi d'infrarouge, fréquence en delà du rouge, alors que la longueur d'onde du rouge est plus longue. C'est à dire que l'infrarouge est moins puissant, moins énergétique que l'ultraviolet. En parlant en longueur d'onde, l'infrarouge se situe donc au delà de 0,8 μ m, et il regroupe les longueurs d'onde des rayonnements de la matière plus froide que celle chaude comme la lampe à incandescence, est vue directement avec nos yeux. Nous ne voyons donc pas le rayonnement infrarouge avec nos yeux. La lampe dite "infrarouge" est moins alimentée que la lampe à incandescence normale : elle consomme moins d'énergie et est donc plus froide. Elle est conçue pour émettre principalement dans l'infrarouge, pour chauffer moins qu'une lampe normale.

Ainsi, la thermographie est rapide, tout autant que sa mise en oeuvre, elle procure une vision immédiate, globale et discriminative. C'est une méthode puissante de vision du froid, du plus chaud ou du plus froid.

3.3.2.4 Différents instruments de mesure

A- Le thermomètre infrarouge

Les thermomètres infrarouges sont particulièrement recommandés dans des domaines où la mesure de température par contact est impossible:

- nécessite une réponse rapide
- sur des objets en mouvement
- derrière une fenêtre
- si le thermomètre peut être détruit par le contact
- si un profil de température existe sur la surface
- si la température peut être affectée par le contact

B- La caméra infrarouge

La caméra infrarouge ne mesure pas les températures, mais les rayonnements, alors que, visualisée par le thermographe, l'image thermique que la caméra fournit pourra être transformée en thermogramme, en images des températures. C'est bien ce que l'on cherche pour déterminer l'état de santé des matériels et surtout prévoir ce qui se passera dans l'avenir, en maintenance prédictive. Le thermographe, aidé de sa caméra, va voir dans l'infrarouge les objets froids et, parmi ces objets, ceux qui sont anormalement chauds ou anormalement froids. Ayant vu, le thermographe pourra quantifier et fournir une cartographie des températures.

C - En première conclusion

Pour estimer l'état de santé d'une installation, et prévenir les risques (incendie, arrêt de production, etc.), il y a nécessité de voir et de mesurer : la thermographie (caméra thermique et thermographe) permet d'assurer cette analyse quand l'état de santé est corrélé avec les températures, c'est à dire très souvent, en électricité, en électromécanique, en thermique, en mécanique.

3.3.2.5 Quelques exemples de défauts détectés par caméra infrarouge :

a- Installation électrique

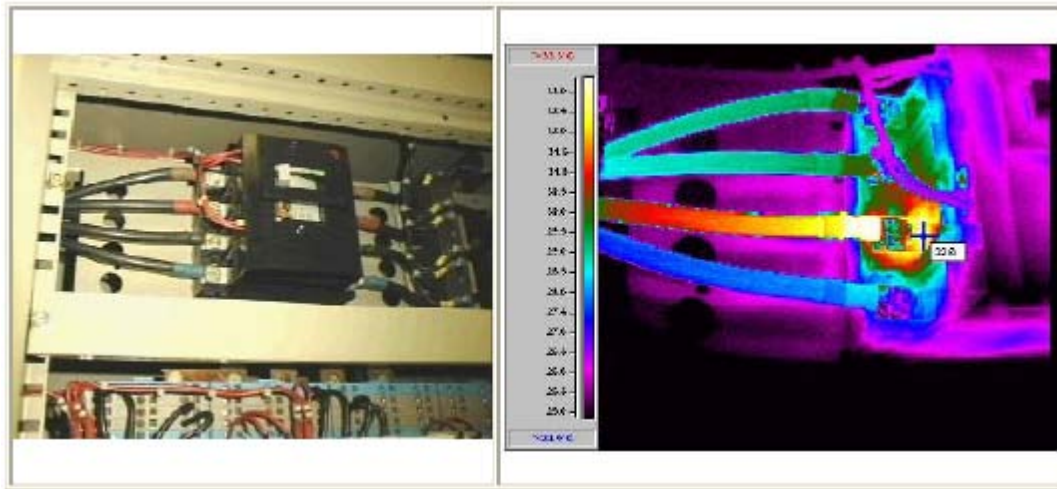


Figure 3.2 : Exemple de défaut sur une installation électrique

b- Installations mécaniques :

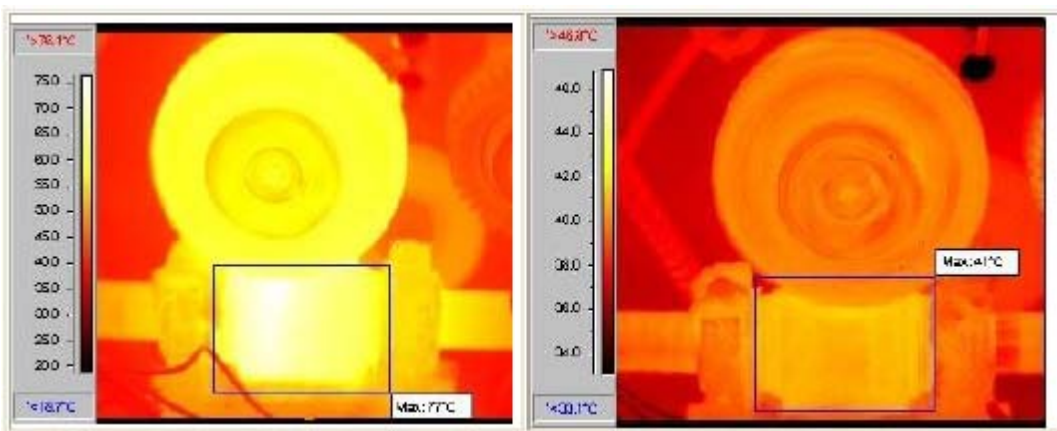


Figure 3.3 : Défaut d'engrenage Avant et après correction

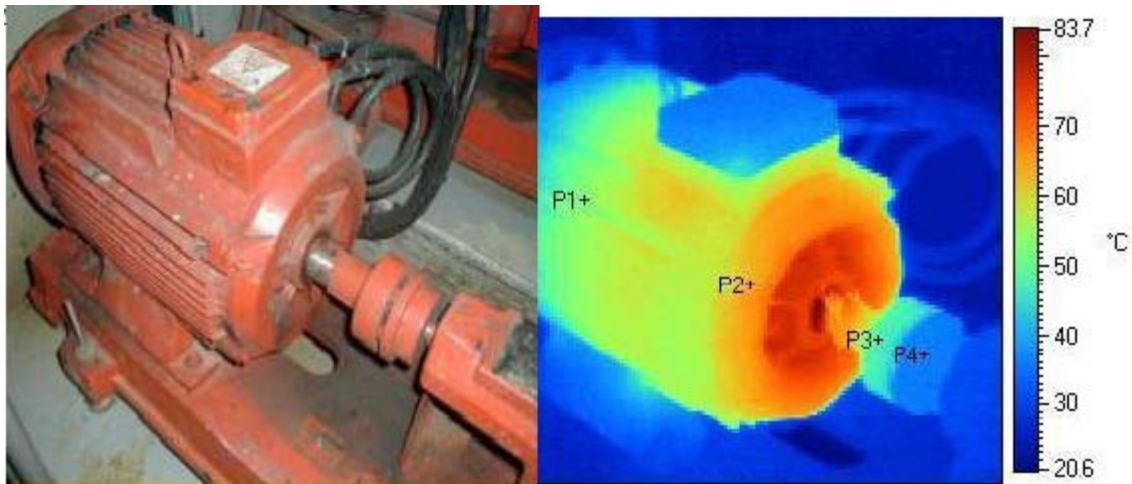


Figure 3.4 : Défaut de roulement

Conclusion

Les programmes de Maintenance Conditionnelle par thermographie permettent de localiser les points chauds bien avant leur évolution vers une situation grave pour l'entreprise.

Eviter les arrêts de production, par des programmes de maintenance et de contrôles de qualité, est un objectif que la thermographie permet d'atteindre très vite.

3.3.3 Surveillance et analyse des huiles industrielles

3.3.3.1 Généralité

Le principe de la surveillance des lubrifiants repose sur le prélèvement représentatif de leur charge dans un système en fonctionnement afin de réaliser une éventuelle analyse pour une détermination de niveaux de dégradation et de contamination. Une comparaison des résultats obtenus avec ceux des prélèvements antérieurs permet de suivre l'évolution de ces lubrifiants afin d'en déduire l'état de santé d'un équipement de production.

Le lubrifiant est maintenu en service si les niveaux de dégradation et de contamination ne dépassent pas le seuil admissible prévu, dans le cas contraire il est impératif de procéder au remplacement de la charge d'huile après vérification, à moins qu'il existe une possibilité d'intervention pour corriger par des actions de maintenance adaptée, les anomalies observées.

3.3.3.2 Les différentes méthodes d'analyse des huiles:**A - La chromatographie en phase gazeuse (CPG)**

C'est une nouvelle méthode qui consiste à séparer des mélanges gazeux ou de composés vaporisables à haute température. On injecte dans une colonne métallique de quelques millimètres de diamètre le mélange à analyser enroulée sur elle-même et qui contient la phase fixe. Un gaz vecteur inerte véhicule sous pression les composés. Le gaz vecteur généralement utilisé est l'hélium ou l'argon. Le temps de parcours d'une colonne par un constituant gazeux est son temps de rétention caractéristique. Les constituants sont ainsi séparés par la différence entre leurs temps de rétention respectifs.

B - La centrifugation

Elle permet de séparer dans une solution liquide des particules solides de densités différentes. Puisque les centrifugeuses sont animées d'un mouvement circulaire très accéléré, l'action de la pesanteur peut être négligée. Les particules s'animent d'un mouvement radial et horizontal plutôt que d'être en suspension verticale, Elles viennent alors s'accumuler de façon ordonnée au fond des tubes de centrifugation.

C- L'extraction

Ce procédé chimique consiste à séparer un composé d'un mélange ou d'une solution. Un solvant dans lequel le composé soluble à extraire est généralement utilisé, toute en prenant garde que les produits dont il doit être séparé ne le soient. Il est impératif d'effectuer des opérations successives avant l'isolation du composé par distillation ou par évaporation du solvant.

L'autre méthode possible est le procédé par réaction chimique entre le composé à extraire et un réactif que l'on peut facilement séparer du reste de la solution.

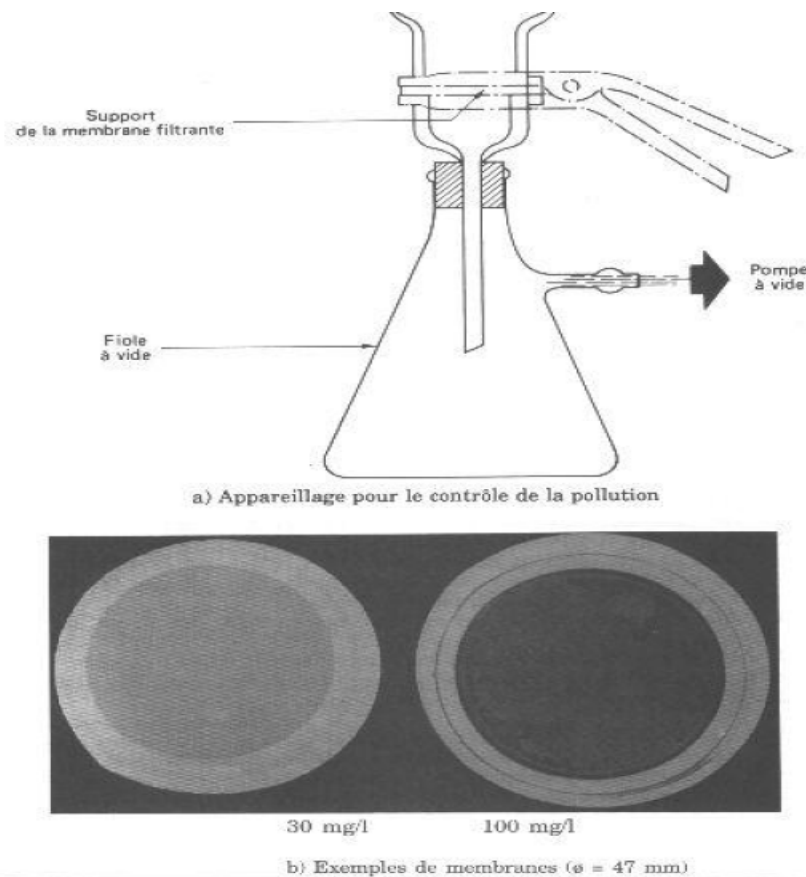


Figure 3.5 : Détermination de la pollution gravimétrique pour le contrôle de la contamination des huiles hydraulique

D- Analyse par ferrographie

Cette méthode permet une fixation de la contamination par les particules métalliques magnétiques d'un échantillon d'huile en service puis à en évaluer l'importance, ou à observer la morphologie des particules d'usure.

On distingue principalement deux types de techniques :

- la ferrographie à lecture directe

Elle consiste à mesurer les valeurs des critères « L » et « S » respectivement représentatifs de la quantité de grosse et de petites particules métalliques présentes dans l'échantillon analysé. On fixe les particules métalliques magnétiques ou autre dans un tube en verre sous l'action d'un champ magnétique et positionnées en fonction de leur susceptibilité magnétique et de leurs dimensions. On mesure la densité optique des dépôts, puis on en déduit les valeurs des critères « L » et « S » grâce à un système optique.

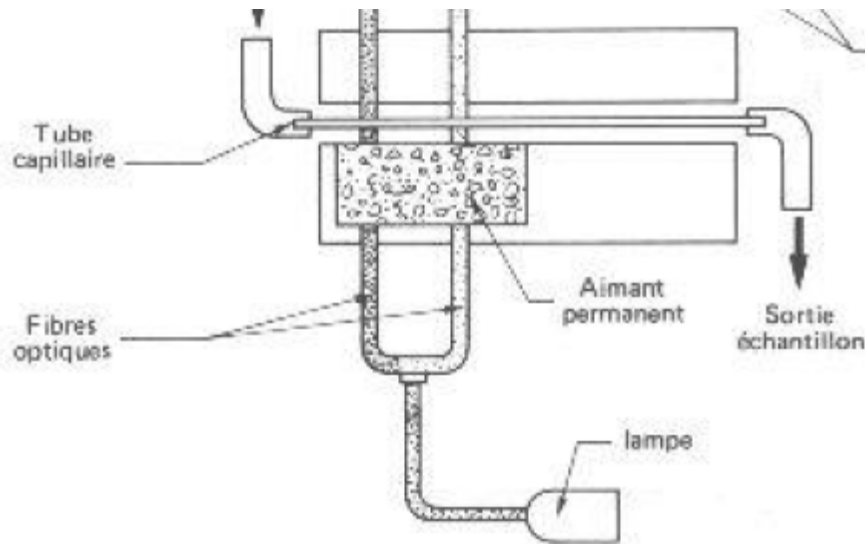


Figure 3.6 : Principe du ferrographe à lecture directe

- **La ferrographie analytique**

La méthode consiste à étudier rigoureusement des particules contaminantes lorsque la ferrographie à lecture directe indique une usure importante ou anormale.

Le principe est analogue à celui de la ferrographie à lecture directe, mais le dépôt s'effectue sur un ferrogramme utilisé comme support plan. Une procédure de lavage permet d'éliminer l'huile, et après séchage, de fixer les dépôts sur le support, rendant possible l'observation des particules. On utilise un microscope optique pour identifier visuellement les particules d'usure.

E - Spectrographie infrarouge

Son principe consiste à faire traverser un corps par un rayonnement, infrarouge en particulier afin de noter son comportement car si un corps est traversé par un rayonnement (infrarouge en particulier), certaines de ses liaisons entrent en résonance pour certaines fréquences du rayonnement. En effet, le rayonnement subit une atténuation à ces fréquences, caractéristiques des liaisons du produit observé.

La concentration de la liaison considérée est en relation avec l'importance de l'atténuation. Les pics sont caractéristiques à chaque produit organique. Le spectre obtenu est « l'empreinte digitale » d'un produit.

La spectrographie infrarouge, est une technique qui aide à analyser l'état des huiles industrielles (nature des hydrocarbures, nature des additifs...) et de suivre leur évolution en

service (formation de produits d'oxydation, concentration des additifs, contamination par d'autres produits...).

Une connaissance approfondie de la formulation des produits permet une bonne interprétation des spectres il est nécessaire d'avoir un échantillon de l'huile neuf et son spectre afin de les comparer et déterminer le niveau de dégradation, lors d'une analyse de produits en service, .

3.3.4 Contextes économiques

Il n'est pas toujours appréciable de généraliser les opérations de surveillance particulièrement lorsque le volume d'huile en service est faible, du point de vue économique.

Cependant, elles s'avèrent importante lorsque « les arrêts machines » sont onéreux ou lourds de retombés.

3.3.5 Conclusion

A l'issue de notre travail, il en résulte de notre analyse que le contrôle des lubrifiants permet d'identifier l'état de dégradation d'une machine tournante par exemple l'usure d'un réducteur.

On a remarqué que ces derniers jouent un rôle très important dans une entreprise car on a vu qu'à partir d'une simple analyse, on peut facilement déceler un défaut pouvant entraîner à un arrêt de production. Donc cette analyse permet de protéger une installation, d'éviter d'éventuelles pannes, de faire des économies, d'assurer la qualité d'une production et d'augmenter la sécurité du personnel : c'est un excellent outil de prévention (maintenance). On a vu que les huiles sont constituées de plusieurs familles et que chacune d'elles possède des caractéristiques diversifiées.

Certaines de ces caractéristiques permettent à l'agent de maintenance de porter un jugement sur la qualité de l'huile à surveiller dans un poste de travail parmi elles la viscosité, l'indice d'acide total, point d'éclair...

3.3.6 L'analyse acoustique

Moins répandues que les précédentes mais néanmoins intéressantes. L'analyse acoustique, permet de détecter tout bruit anormal à l'aide de microphones placés (le plus souvent) à distance de l'équipement, ou le **contrôle ultrasonore**, qui permet de détecter des défauts

de faible amplitude à haute fréquence. Cette méthode permet également au contrôleur de déterminer les conditions de fonctionnement des équipements telles que :

- les conditions de lubrification (trop, pas assez, graisse sale,...),
- les degrés d'usure,
- les vibrations.

Ces informations sont interprétées par le contrôleur qui dispose d'un casque d'écoute et d'une indication numérique et sont transformées, par la base de données, en consignes de maintenance (degré d'urgence).

A titre d'information, de nombreuses enquêtes ont été réalisées en 1999 auprès d'utilisateurs industriels dans de multiples domaines. Avec leur aimable permission de reproduire les résultats de leurs enquêtes le tableau suivant donne le pourcentage des techniques utilisées régulièrement ou occasionnellement dans les industries [REVE94].

3.3.7 L'analyse vibratoire

Est la plus connue et la plus largement employée. Il faut dire qu'elle permet à elle seule de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Un balourd, un jeu, un défaut d'alignement, un roulement usé ou endommagé... se traduisent par une variation des efforts internes que subit la machine, et donc à une modification de son comportement vibratoire.

En plaçant des accéléromètres aux endroits où se transmettent ces efforts (c'est-à-dire sur les paliers des machines), on peut alors suivre l'état de santé de l'équipement.

La méthode présente trois gros avantages :

- a- *les mesures sont faciles à prendre,*
- b- *les défauts sont détectés à un stade précoce,*
- c- *possibilité de réaliser un diagnostic approfondi pour en connaître l'origine,*

Bref, c'est un peu "la" méthode incontournable...

C'est pour cette raison qu'on va la développer en détaille dans le chapitre 4 .

3.4 Choix des méthodes de surveillance

3.4.1 Choix selon le type de défaut

Entre ces différentes méthodes, le choix n'est curieusement pas si difficile. Chaque méthode a son champ d'applications privilégié, C'est pourquoi elles entrent rarement en concurrence. L'analyse vibratoire, par exemple, convient aux défauts liés à la cinématique et à la structure de la machine, mais dans une plage de fréquence déterminée (située

généralement entre quelques hertz et plusieurs dizaines de kHz). Elle couvre alors les défauts structurels (basse fréquence), les défauts spécifiques aux roulements (à plus haute fréquence), ainsi que la majorité des dysfonctionnements les plus courants (qui se situent souvent en deçà de 5 kHz). En dehors de cette plage de mesure, on utilise d'autres méthodes. « Au-delà de 20 kHz, il est souvent préférable de réaliser un contrôle par ultrasons ou par thermographie infrarouge ». Il en est de même avec l'analyse acoustique, qui se limite à la détection de bruits dans des fréquences audibles.

Tableau 3.2 : Principales méthodes de détection

Types de défauts	Analyse vibratoire	Analyse d'huile	Thermographie	Analyse acoustique
Déséquilibre, balourd	OUI	NON	OUI	OUI
Défauts de roulement	OUI	OUI	OUI	OUI
Défauts des engrenages	OUI	OUI	OUI	OUI
Défauts de courroies	OUI	NON	OUI	OUI
Défauts d'alignement	OUI	NON	OUI	NON
Défauts dû à la dégradation d'huile	NON	OUI	NON	OUI
Manque d'huile	OUI	OUI	OUI	OUI
Défauts électriques	OUI	NON	OUI	OUI
Défauts d'écoulement	OUI	NON	NON	OUI
Jeu	OUI	NON	OUI	OUI

Tout dépend donc des défauts que l'on souhaite détecter... Ainsi, par exemple « *dans le cas d'un défaut de roulement, qui commence à se manifester à haute fréquence puis se déplace à une fréquence de plus en plus faible (avec une énergie croissante) au fur et à mesure de sa dégradation, les ultrasons vont permettre de réaliser une détection à un stade plus précoce que l'analyse vibratoire ou l'analyse acoustique, et lorsque la dégradation du roulement se manifeste en zone audible, il est souvent trop tard* ». De même, les défauts liés au phénomène de cavitation ou aux écoulements de fluides, qui se manifestent à basse fréquence, sont détectés par un contrôle ultrasonore...[CHEV00].

Tableau 3.3 : Choix des méthodes de détection des défauts

	Avantages	limitations	Champ d'application
Analyse vibratoire	<ul style="list-style-type: none"> - Détection de défauts à un stade précoce - Possibilité de réaliser un diagnostic - Autorise une surveillance continue - Permet de surveiller l'équipement à distance (télémaintenance) 	<ul style="list-style-type: none"> - Spectres parfois difficiles à interpréter - Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses 	Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure
Analyse d'huile	<ul style="list-style-type: none"> - Détection d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure, ou un échauffement lubrification, analyse des éléments d'usure, - Possibilité de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules 	<ul style="list-style-type: none"> -Ne permet pas de localiser précisément le défaut -Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon 	Contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de n'entraîne une usure analyse de contamination par le process (étanchéité), etc.
Thermographie	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation - Interprétation souvent immédiate des résultats - Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi 	<ul style="list-style-type: none"> - Détection de défauts à un stade moins précoce que l'analyse vibratoire - Contrôle limité à ce que "voit" la caméra (échauffements de surface) - Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi 	- Détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque de lubrification en particulier)
Analyse acoustique	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de détecter l'apparition de défauts audibles - Autorise une surveillance continue 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité au bruit ambiant - Diagnostic souvent difficile à réaliser - Problèmes de répétabilité des mesures 	Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire

Du côté de l'analyse d'huiles, c'est un peu la même démarche. *« Elle permet d'abord de s'assurer que l'huile joue bien son rôle, autrement dit que ses caractéristiques physico-chimiques (sa viscosité, par exemple) ne sont pas altérées, et ne vont pas nuire au bon fonctionnement de l'équipement »*. D'autre part, les particules présentes dans l'huile vont révéler l'usure anormale d'un ou de plusieurs organes. Ou alors la présence d'une pollution extérieure (des poussières dues au mauvais état d'un filtre, par exemple) avant que celle-ci n'entraîne l'usure d'un élément. Dans ce cas, *« la détection est plus précoce que des méthodes telles que l'analyse vibratoire, qui ne détecte que la conséquence de la pollution »*, La contre partie, *« c'est que l'on a besoin des débris d'usure! Mais il peut très bien survenir des dysfonctionnements qui ne génèrent pas assez de particules pour être*

détectés... Inutile alors d'espérer détecter un balourd, un jeu ou encore un défaut d'alignement s'ils n'engendrent pas l'usure d'un composant...

D'autre part, pour que l'analyse des débris d'usure (par un comptage de particules, par exemple) soit significative, il faut qu'elle soit appliquée à des machines peu polluées dans leur état normal (c'est le cas par exemple des machines hydrauliques). « *Sinon, comment être sûr que les particules que l'on compte sont bien dues à une pollution anormale ?* ».

Tout dépend aussi de la vitesse de dégradation du composant. « *En théorie, il est possible d'utiliser l'analyse d'huile pour détecter un défaut de roulements, puisqu'il se manifeste par des débris d'usure. Mais en pratique, il faut savoir que la défaillance d'un roulement se produit en deux ou trois heures. Donc même si l'on effectue l'analyse au bon moment, il est souvent trop tard pour agir à temps* ». Il en est de même pour la thermographie infrarouge. « *En règle générale, si la température d'un roulement augmente, c'est qu'il est déjà très dégradé ! On a donc très peu de temps devant soi* ».

3.4.2 Choix selon le type d'installation

C'est ce qui explique d'ailleurs que certains fournisseurs aient développé leur propre outil de surveillance. Par exemple pour les roulements on préconise la méthode dite "d'onde de choc". Son principe est basé sur l'utilisation d'un capteur dont la bande passante est centrée sur la fréquence des chocs émis par le roulement. On ne surveille alors que les défauts provenant de ce composant [DESP00].

En réalité, il n'existe pas de méthode universelle permettant de détecter de manière assez précoce tous les types de défauts que l'on est susceptible de rencontrer sur une machine tournante. La méthode idéale consiste alors souvent à réaliser un "savant mélange" des techniques pour en exploiter la complémentarité. « *Dans le cas d'une turbine entraînant un alternateur, par exemple, il est courant d'utiliser l'analyse d'huiles pour surveiller l'état des paliers, et la surveillance vibratoire pour détecter un éventuel dysfonctionnement de l'alternateur* ».

3.5 Exploitation de la complémentarité des méthodes

Comme on vient de le remarquer, il n'existe pas de méthode universelle permettant de détecter à un stade précoce tous les types de défauts d'une machine tournante. La méthode idéale consiste alors souvent à réaliser un "savant mélange" des techniques pour en exploiter la complémentarité.

- L'analyse vibratoire est généralement utilisée en complément des autres méthodes, lorsque celles-ci ne sont pas suffisantes pour réaliser un diagnostic, par exemple en thermographie, il est difficile de connaître l'origine d'un échauffement, Pour connaître son origine, il est indispensable d'associer la thermographie à un diagnostic par analyse vibratoire.
 - Pareillement, l'analyse d'huile détecte à un stade précoce l'usure d'un organe, alors que la localisation peut être effectuée par une analyse vibratoire. Enfin, si l'on veut connaître l'origine d'un défaut par analyse d'huiles, il faut réaliser différents traitements de l'échantillon prélevé. La plupart des analyses sur site ne permettent que de détecter une pollution anormale ou de contrôler les principales caractéristiques du lubrifiant (viscosité, indice d'acide, teneur en eau, etc.). Pour aller plus loin, on réalise des analyses en laboratoire par spectrométrie ou ferrométrie.
 - La spectrométrie permet d'identifier la nature des particules métalliques de petite taille (moins de 5 μm), et la ferrométrie est utilisée pour les particules plus importantes (jusqu'à 300 μm).
 - Pour ce qui concerne l'analyse acoustique, sa résolution fréquentielle est souvent trop faible pour pouvoir localiser précisément le défaut, ainsi, pour effectuer une mesure globale en continu du bruit ou des vibrations, il est conseillé de jouer au "chien de garde", cette méthode de contrôle remplace le mécanicien qui traditionnellement collait son oreille à un tournevis en contact avec la machine pour la détection d'un bruit anormal.
- En bref, la surveillance d'un parc de machines tournantes nécessite un grand nombre de choix stratégiques, et la mise en place d'une démarche rigoureuse et bien fondée.

3.6 Perspectives de la maintenance prédictive au sein d'une centrale électrique

3.6.1 Problématique de la maintenance

Les équipements industriels sont perturbés par les dysfonctionnements qui peuvent affecter les coûts de production, la disponibilité et la sûreté des installations, la qualité des produits et des services, la sécurité des personnes, et l'environnement. La maintenance élabore des actions pour limiter les effets de ces perturbations et permettre d'atteindre ainsi les performances exigées. Elle compare les objectifs de l'entreprise aux résultats donnés par l'expérience. Les méthodes et les techniques utilisées permettent de construire des stratégies qui assistent les responsables de maintenance dans leurs décisions d'actions.

Pour optimiser la maintenance de leurs équipements, les industries de process se sont généralement tournées vers la méthode RCM (Reliability Centered Maintenance), qui exploite une décomposition des équipements, une analyse des défaillances des composants élémentaires et des données de fiabilité pour déterminer les risques. C'est le cas de SONELGAZ qui, après avoir étudié ce qui se faisait dans les pays développés . Depuis, elle essaye d'adaptée des méthodes basées l'optimisation de la maintenance au sein des centrales électriques.

Dans ce cas, il s'agit de mettre en œuvre une démarche rationnelle de maîtrise des risques(probabilité, conséquence...) associés aux défaillances des composants de l'installation. La méthode permet de déterminer les matériels sur lesquels des actions préventives sont nécessaires, quelles sont les actions à effectuer, et quand il faut les réaliser.

Au-delà de leur rôle pour la programmation d'une maintenance systématique, ces études permettent souvent de reconsidérer la maintenance effectuée, de mettre en évidence les besoins, les coûts et les gains potentiels. On constate souvent qu'elles conduisent à réduire la fréquence des interventions intrusives, voire à les supprimer, et à insérer dans les programmes des tâches de surveillance en fonctionnement moins coûteuses qui permettent de suivre l'évolution des dégradations. Ces études débouchent donc souvent sur la mise en place ou le développement de techniques de maintenance conditionnelle.

3.6.2 Application de la maintenance prédictive à la SONELGAZ

La société nationale d'électricité et du gaz SONELGAZ a depuis longtemps cherché à améliorer la disponibilité et la sûreté de ces installations de production, et, pour ce faire, a mis en œuvre des techniques de surveillances de ces équipements; surveillance vibratoire des turbo-alternateurs, surveillance des chaudières à flamme... Le lancement de nouvelles centrales électrique oblige SONELGAZ à étudiée et à développé des systèmes de surveillance pour la détection précoce des anomalies et l'aide au diagnostic des défauts des composants des centrales de production électrique.

Aujourd'hui, SONELGAZ utilise les principales techniques de surveillance existantes et applique ces techniques sur la plupart des matériels des centrales électriques. Le tableau 3.5 indique les techniques de surveillance utilisées pour les principaux composants.

Tableau 3.4 : Techniques de surveillance pour différents composants de la centrale

	Détection de fuites	Surveillance vibratoire	Surveillance acoustique	Surveillance chimique	Mesures électriques	Thermographie infrarouge	L'aide au diagnostic
Circuit primaire	X	X	X				X
chaudières	X		X			X	
Générateur de vapeur	X						
Echangeur de chaleur	X			X			
robinetterie	X		X		X	X	X
turbines		X		X			X
Machines tournantes auxiliaires		X					X
Pompes primaires		X		X			X
Transformateurs			X	X		X	
tuyauteries	X						
alternateurs		X			X		X
Diesels de secours		X					X

Les principales techniques utilisées en surveillance donnent lieu à des applications opérationnelles à la SONELGAZ comme l'indique le tableau ci-dessus. Les principaux besoins en surveillance apparaissent couverts.

toujours simple à interpréter et demande un certain niveau d'expertise, d'autre part, les défaillances étant rares, un utilisateur sur site n'a, en général, pas d'expérience antérieure d'événements similaires lui permettant de reconnaître un problème connu ni de se constituer assez rapidement une expertise de diagnostic.

Il a alors été décidé de proposer des supports pour l'activité de diagnostic, permettant de guider les services de maintenance d'un exploitant et de leur simplifier le travail d'interprétation. Ainsi, pour plusieurs matériels (par exemple, le groupe turboalternateur, les machines tournantes auxiliaires, la détection de corps migrants, etc.), ont été rédigés des «guides de diagnostic », déroulant pas à pas une démarche conduisant des observations effectuées à l'identification de défaillances ou de dégradations probables. En l'absence de tels guides, pour certains matériels, des recueils de fiches défauts, structurant les observations attendues comme manifestations de tous les défauts connus ou plausibles, ont été constitués. S'ils ne proposent pas de démarche de diagnostic, ces recueils permettent

toutefois un examen rapide et systématique des manifestations attendues des défauts possibles, ce qui rend assez simple l'identification des défauts compatibles avec des informations de surveillance. Ces recueils permettent également, en comparant directement manifestations attendues et informations de surveillance de confirmer des hypothèses de défauts.

Afin de compléter l'aide proposée par les guides de diagnostic et d'en simplifier l'utilisation, SONELGAZ doit développer des outils informatiques d'aide au diagnostic. Ces outils de type « systèmes à base de connaissances » s'appuient sur une représentation explicite de l'expertise de diagnostic.

3.6.3 Rénovation des systèmes de surveillance existants

Une surveillance en continu dans quelques centrales électrique est actuellement en place à SONELGAZ. Il s'agit, pour rappel, de la surveillance vibratoire du groupe turboalternateur, des organes d'admission, de la détection de corps errants dans le circuit primaire et de la surveillance des structures internes.

Le retour d'expérience de ces systèmes confirme la pertinence des principes de surveillance mais met en évidence les limites d'utilisation de ces systèmes, souvent de technologie ancienne, et notamment des problèmes d'obsolescence importants. Par ailleurs, d'autres matériels, notamment l'alternateur et les pompes primaires, d'un coût d'investissement ou d'enjeux équivalents, n'ont pas encore fait l'objet d'une surveillance systématique en continu. Le retour d'expérience international montre toutefois l'intérêt de la surveillance en continu de ces matériels.

Aussi, en réponse à la fois aux limites des systèmes de surveillance actuels et aux nouveaux besoins de surveillance de certains matériels, une architecture fédératrice a été développée: le Poste de Surveillance et d'Aide au Diagnostic (PSAD). Cet outil modulaire intègre sur un même poste d'analyse les fonctions de surveillance de l'ensemble des matériels traités. Il permet aux fonctions de surveillances de différents matériels de partager des ressources et formats communs (stockage, consultation, traitements ...). Sa structure modulaire fournit un cadre pour l'intégration de systèmes de surveillance destinés à de nouveaux équipements.

Le dossier de remplacement des systèmes existants par ce nouveau système est en cours d'instruction.

3.6.4 Mise à jour des programmes de maintenance

Lors de la mise en service d'une installation, des programmes de base de maintenance préventive (PBMP) sont rédigés. A partir de données de conception et du retour d'expérience de matériels similaires, ces programmes définissent, pour chaque matériel, les opérations de maintenance préventive à mettre en œuvre et leur périodicité.

Ces programmes doivent ensuite être actualisés à partir des données de retour d'expérience. Ainsi, pour la plupart des matériels, une AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) soit réalisée. Cette analyse a conduit à identifier des composants critiques au sens de la disponibilité, de la sûreté et des coûts de maintenance. Elle a permis de proposer des actions de surveillance conduisant à espacer des visites systématiques, voire dans certains cas de les supprimer, évitant ainsi des arrêts et des démontages inutiles.

3.6.5 L'organisation de l'expertise

Les outils de diagnostic qui ont été développés sont destinés aux services de maintenance d'un exploitant. Ces services réalisent, en centrale, une analyse dite de « premier niveau ».

Cependant, la confrontation des retours d'expérience acquis sur différents sites, la mise en place d'études et de campagnes d'essais, etc. font que les compétences nécessaires à une surveillance optimale des machines et au diagnostic de leurs défauts sont disponibles auprès d'acteurs répartis dans différentes structures de l'entreprise.

Pour favoriser l'exploitation optimale de ces compétences, il a paru opportun, pour certains composants clés, de formaliser un « réseau d'expertise » qui possède les missions suivantes :

- assurer des services opérationnels d'appui à l'exploitant, notamment des services de diagnostic « de niveau 2 » (diagnostic plus détaillé que le niveau 1, traitement des cas délicats ...) et de formation .
- capitaliser, maintenir et développer les connaissances pour la surveillance et le diagnostic (division Recherche et Développement),

Les services centraux de la division Production électrique assurent l'animation de ce réseau d'expertise.

L'objectif de cette organisation est d'optimiser l'utilisation des compétences dans l'entreprise, de proposer un service à toutes les centrales et de capitaliser les connaissances dans le domaine de la surveillance et du diagnostic.

3.7 Questions liées au choix de la maintenance prédictive

Avant de généraliser un système de surveillance ou d'installer ponctuellement un nouveau système de surveillance sur un matériel, il est nécessaire d'envisager les questions essentielles des besoins et enjeux fonctionnels ou organisationnels de la surveillance.

3.7.1 Apports fonctionnels de la surveillance

Lorsqu'on veut placer la surveillance par rapport à l'ensemble des dégradations et défaillances qui peuvent affecter un matériel, on doit distinguer:

- Les dégradations détectables par une surveillance en exploitation.
- Les dégradations non détectables par la surveillance classique mais qui peuvent être mises en évidence par des contrôles non intrusifs (par exemple, par des contrôles aux ultrasons).
- Les dégradations dites cachées, que seules une visite intrusive permet d'identifier et de quantifier.

Les apports fonctionnels de la surveillance sont très importants et de différentes natures :

- Prévention des risques majeurs,
- Optimisation de la maintenance,
- Aide à l'exploitation des matériels.

3.7.2 Prévention des risques majeurs

Un souci permanent d'un exploitant est de prévenir les défaillances et incidents majeurs des matériels (exemple, la fissure d'arbre d'une machine tournante ...). Une «bonne» surveillance a donc pour premier objectif l'aider à la prévention. Elle est par conséquent centrée sur la détection précoce des dégradations et leur diagnostic. Elle contribue ainsi à augmenter la disponibilité et la sûreté des installations et la sécurité des personnes.

La surveillance permet de minimiser les conséquences d'un incident en :

- réduisant les coûts de réparation et d'inspection. Ainsi le desserrage d'un palier d'une pompe primaire non détecté de façon précoce peut générer des coûts de réparation élevés et près de deux semaines d'indisponibilité.
- limitant les durées d'indisponibilité en programmant au mieux les arrêts c'est-à-dire en remplaçant l'indisponibilité fortuite, qui fait suite à une défaillance imprévue, par une indisponibilité programmée (par exemple en profitant d'un arrêt de week-end) beaucoup moins pénalisante en terme de coûts.

La surveillance contribue à la sûreté de fonctionnement en détectant de façon précoce des anomalies qui peuvent entraîner des conséquences graves affectant en dernier lieu la sûreté. Elle permet de réduire la dosimétrie en diminuant les visites systématiques et d'améliorer la sûreté de fonctionnement.

3.7.3 Optimisation de la maintenance

La surveillance est un moyen de maintenance prédictive qui aide à mieux connaître l'état du matériel grâce à la détection précoce et au diagnostic. Elle peut constituer une alternative économique à des tâches de maintenance préventive intrusives qui nécessitent des démontages.

A titre d'exemple, la surveillance permet de :

- supprimer certaines visites des paliers des pompes primaires en détectant de façon précoce leur desserrage par une surveillance vibratoire,
- supprimer la visite des paliers des groupes turboalternateurs grâce à un suivi des températures des coussinets en marche nominale et en transitoire de vitesse,
- remplacer un contrôle par ultrasons, qui nécessite l'ouverture des corps de turbine, par une surveillance vibratoire en fonctionnement pour la détection précoce de fissure.

Les gains de la surveillance apparaissent dans la possibilité de s'affranchir des défauts graves pour la définition des périodes d'ouverture des machines. Ainsi, pour certains producteurs d'électricité, en faisant l'hypothèse qu'un contrôle par ultrasons pouvait être remplacé par une surveillance vibratoire même si celle-ci offre un niveau de détection plus faible, la période d'ouverture des corps de turbine a pu être établie à environ 10 ans.

De façon plus générale, la surveillance permet l'optimisation individualisée de la maintenance des matériels surveillés en fonction de leurs caractéristiques et de leurs performances propres.

3.7.4 Aide à l'exploitation des matériels

La surveillance permet d'améliorer l'exploitation des matériels, par exemple en substituant des conditions d'exploitation particulières (par exemple, réduction de la charge pour respecter un critère vibratoire) à une indisponibilité totale. Elle apporte de plus des éléments permettant de remédier au problème (diagnostic) et par conséquent de limiter ces temps de fonctionnements particuliers.

Un cas particulier important d'aide à l'exploitation est la réduction du temps nécessaire à un équilibrage d'une machine tournante grâce à la mise en place d'une surveillance vibratoire. Cette surveillance évite en effet de devoir rajouter une chaîne de mesure complémentaire pour suivre l'équilibrage et elle rend possible de réduire le nombre de lancers car l'état vibratoire à prendre en compte pour l'équilibrage (marche nominale) et les résultats des tests des plans d'équilibrage ont pu être stockés par le système de surveillance.

3.8 Apports organisationnels de la surveillance

Les nouvelles architectures des systèmes de surveillance, et les traitements qu'ils proposent pour aider à l'interprétation des mesures «brutes» apportent une plus grande autonomie aux centrales pour le suivi du comportement des matériels surveillés, l'interprétation et le diagnostic des anomalies et incidents.

Elles permettent également l'automatisation des tâches fastidieuses d'exploitation des systèmes actuels (relevés systématiques ...) pour les concentrer sur celles d'interprétation et de diagnostic. Elles permettent de plus le transfert des informations nécessaires pour une assistance des experts nationaux.

3.9 Impacts de la maintenance prédictive sur les métiers

La maintenance prédictive est une approche puissante permettant de réduire certains coûts à travers une «individualisation» de la maintenance. Elle s'appuie sur l'analyse du comportement effectif du matériel via la surveillance.

Sa mise en œuvre induit une prise de risque en terme de prévision budgétaire (pièces détachées ...), de gestion de ressources d'intervention (main d'oeuvre) et de disponibilité du matériel (risque d'aléas). Elle demande du personnel compétent, qui possède de l'expérience et des connaissances sur l'historique du matériel et l'interprétation de son comportement. De ce fait, il est difficile de prouver a priori que la maintenance prédictive est rentable à court terme et la politique de gestion des ressources humaines (mobilité, gestion des carrières ...) ne favorise pas toujours la formation de personnel expérimenté. Sa mise en œuvre génère donc un travail supplémentaire de collecte et d'analyse pour le personnel et une prise de risque qui n'est pas obligatoirement reconnue.

De plus, la lourdeur du processus de modification des programmes de maintenance et la charge induite par la nécessaire justification auprès des responsables découragent parfois des tentatives dans le domaine. De fait, sur beaucoup de sites, la motivation initiale de mise en place de la maintenance prédictive s'est émoussée.

Il est donc essentiel, à travers une organisation «souple », d'accompagner la mise en place de la maintenance prédictive montrant son intérêt technico-économique, qui permettent d'envisager les charges supplémentaires induites comme un investissement rentable, de la formation nécessaire et de la reconnaissance des tâches accomplies.

3.10 Conclusion et perspectives

A la lumière de tout ce que nous venons de démontrer, il en résulte de nos analyses que, dans le contexte économique et concurrentiel actuel, la réduction des coûts de production est la clé du développement et de la survie de l'entreprise. La réduction des coûts de maintenance et l'augmentation des taux de disponibilité des équipements constituent un enjeu vital pour toute unité de production en continu ou à flux tendu. L'augmentation de la durée de vie des équipements, précisément des machines tournantes devient elle aussi un argument de poids en cette période où l'investissement industrielle est timide. C'est pourquoi la mise en place d'un programme de maintenance prédictive, permettant de répondre à un tel défi, s'avère nécessaire.

Et pour faire face à ces nouveaux enjeux, la maintenance doit faire appel à des techniques d'investigation modernes très spécifiques telles que l'analyse vibratoire, la thermographie infrarouge, l'analyse des lubrifiants, l'analyse acoustique,...

La mise en place de ces nouvelles techniques d'investigation ne bénéficie pas toujours de la participation du personnel de maintenance et de production et peut même se heurter à une inertie destructrice.

La surveillance et le diagnostic sont un nouveau métier dont les spécificités sont à ce jour non reconnues et pour lequel il n'existe pas la moindre déontologie.

Le contrôle des machines tournantes représente une charge financière lourde pour les entreprises et la réduction des cette charge un enjeu économique certain. Par exemple le contrôle par analyse vibratoire nécessite un personnel compétant et qualifié, aussi l'emploi des outils de surveillance et de diagnostic modernes et performants tels que le collecteur analyseur et des outils informatiques.

Cependant, ces techniques d'investigation sont récentes. Elles s'appuient non seulement sur des techniques de traitement du signal élaborées mais aussi sur la connaissance de tous les symptômes ou images vibratoires et thermiques induits par tous les défauts et pathologies susceptibles d'affecter une machine tournante et sur une analyse déductive, car il n'existe pratiquement pas de relations bijectives entre défaut et image vibratoire.

Tous les symptômes associés aux pathologies et les techniques d'identification sont loin d'être connus à ce jour. L'obtention rapide de ces connaissances, la validation des méthodologies et leur mise en oeuvre pratique par les équipes chargée de la surveillance et du diagnostic des machines tournantes nécessitent :

- Des bancs d'essais et des instruments balayant une plage de vitesse de rotation très étendue.
- Des modélisations mathématiques de comportements des lignes d'arbres, d'organes en présence des défauts ou pour des conditions de fonctionnement difficiles à simuler sur les bancs d'essais ou maquettes.
- La compilation et la synthèse des expériences de terrain des experts.
- La conception, le développement et la mise au point d'outils de mise en oeuvre simple pour lesquels toutes les opérations de traitement du signal, de recherche d'images vibratoires ou thermiques et d'analyse déductive des symptômes jusqu'à la formulation d'un rapport de diagnostic détaillé et argumenté soient entièrement automatisé.

En bref, aucune technique d'investigation ne peut progresser rapidement sans un financement de son développement.

Pour ce faire, le contrôle des machines tournantes se heurte à deux problèmes :

- Un problème purement organisationnel, logistique et culturel : sa mise en oeuvre dans l'entreprise.
- Un problème financier et politique : le financement de l'approfondissement des connaissances sur le comportement des machines tournantes en phase de vieillissement, le financement du développement des outils de surveillance et de diagnostic et des techniques d'investigation sur lesquelles elles reposent.

CHAPITRE 4

Analyse vibratoire

4.1 INTRODUCTION :

Un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position de référence. Le nombre de cycles complets du mouvement dans une période de temps d'une seconde est appelé fréquence et est mesuré en hertz (Hz).

Une machine idéale ne vibrerait pas car toute l'énergie serait employée pour effectuer le travail demandé. En pratique, des vibrations apparaissent, sous-produits de la transmission normale des forces cycliques à travers le mécanisme. Les éléments de la machine interagissent et une partie de l'énergie est dissipée dans la structure sous forme de vibrations.

Une bonne conception produira de faibles niveaux vibratoires. Cependant, la machine vieillissant, les fondations travaillent, les pièces se déforment, et de légers changements dans ses propriétés dynamiques apparaissent. Les arbres se désalignent, les paliers s'usent, les rotors se déséquilibrent, les jeux augmentent. Tous ces facteurs se traduisent par une augmentation de l'énergie vibratoire qui, puisqu'elle est dissipée à travers la machine, excite les résonances et ajoute une charge dynamique considérable aux paliers. Cause et effet se renforcent mutuellement jusqu'à la rupture définitive.

Les vibrations sont normalement un sous produit de la transmission des forces ; elles provoquent une usure de la machine, puis des pannes. Les éléments qui subissent ces forces, par exemple les supports des paliers, sont habituellement accessibles de l'extérieur, si bien que l'on peut mesurer les vibrations dues à ces forces d'excitation

4.2 Définition d'une vibration :

Selon la norme ISO 2041 la notion de vibration est défini comme :

Variation avec le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque l'intensité est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence.

En fait, un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence.

4.3 Objectifs de l'analyse vibratoire:

L'objectif principal de l'analyse vibratoire est d'éviter un maximum de panne. De plus, elle permet de mettre en évidence un grand nombre de problèmes entraînant une diminution de la durée de vie des éléments de la machine, à savoir:

- résonance de structure
- balourd
- mauvaise fixation des roulements
- tension trop élevée des courroies
- mauvais alignement d'une ligne d'arbre

4.4 Principe de l'analyse

L'analyse vibratoire a pour principe de traduire les mouvements relatifs d'une structure soumise à une sollicitation dynamique. L'accélération est la grandeur la plus souvent mesurée. Par une simple intégration (au sens mathématique du terme), elle donne accès à la vitesse puis au déplacement. La mesure de vibrations impose peu de contraintes au niveau de l'installation des capteurs : un ou plusieurs accéléromètres (de type piézoélectrique) placés à proximité de la source vibratoire mesurent les vibrations dans une ou plusieurs directions. Des codeurs sont aussi employés pour détecter les vibrations de rotation et de torsion des lignes d'arbre.

La mesure d'une vibration transmise par la structure d'une machine sous l'effet d'efforts dynamiques sera fonction de multiples paramètres que l'on peut séparer en trois groupes

1^{er} groupe

- Masse, rigidité et coefficient d'amortissement de la structure qui véhicule les vibrations.
- Caractéristiques de fixation de la machine sur le sol qui oppose des réactions aux vibrations et modifie l'intensité.
- Positionnement de la prise de mesure.

Ces éléments sont généralement regroupés sous le terme de « fonction de transfert » caractéristique de la structure.

2ème groupe

- Position et fixation du capteur sur la machine.
- Caractéristiques du capteur.
- Pré amplification et transmission du signal.
- Performance de l'appareil analyseur.

Ces paramètres concernent les caractéristiques de la chaîne de mesure que l'on doit s'efforcer de rendre invariables d'une mesure à l'autre.

3ème groupe

- Vitesse de rotation et puissance absorbée.
- Etat des liaisons de la chaîne cinématique (alignement, balourd, engrenages, roulements, etc.).

L'analyse vibratoire utilise une exploitation des signaux beaucoup plus poussée. Après amplification du signal, différents niveaux d'analyse sont employés pour établir un diagnostic vibratoire de l'anomalie détectée.

- La mesure du niveau global : permet de suivre l'état général de la machine et d'établir des alarmes lorsque le signal dépasse un seuil fixé.
- L'analyse spectrale : permet d'aller plus loin : elle consiste à réaliser la transformée de Fourier (FFT) du signal vibratoire pour obtenir la représentation fréquentielle de la vibration. Elle convient bien pour la détection de défauts d'origine mécanique (balourds) ou hydrauliques. On suit les différentes raies du spectre telles que la fréquence d'engrènement et ses harmoniques.

Enfin, l'analyse de second niveau met en oeuvre des techniques élaborées de traitement du signal, telles que ;

- la détection d'enveloppe, l'analyse cepstrale (bien adaptée aux engrenages), etc. Suivant les informations dont on a besoin, l'une ou l'autre des méthodes est employée.

L'analyse approfondie d'un signal vibratoire dans le domaine spectral est souvent confiée à un spécialiste. Celui-ci doit posséder une "bibliothèque de cas", lui simplifiant l'interprétation des collectes vibratoires.

Il est rare que l'on obtienne un spectre ne comprenant que quelques raies facilement identifiables car plusieurs phénomènes (donc plusieurs raies) sont généralement superposés (balourds, détérioration de roulements...).

A ces signaux peuvent s'ajouter des raies provenant de l'alimentation électrique.

En effet, la présence d'harmoniques peut provoquer une vibration importante des machines.

Comme les signaux de vibrations, les signaux d'émission acoustique peuvent être analysés grâce à un traitement fréquentiel. Cependant, on applique le plus souvent un traitement temporel. Dans ce cas, on ne cherche pas à réaliser un diagnostic approfondi. Seule la détection d'une anomalie est intéressante. Il suffit de considérer l'amplitude des signaux (par exemple, le nombre de dépassements de seuil).

4.5 Théorie de vibration

4.5.1 Vibration harmonique

La transformée de Fourier (FFT : **F**ast **F**ourier **T**ransformer) permet de décomposer une vibration non sinusoïdale en une somme de vibration sinusoïdale.

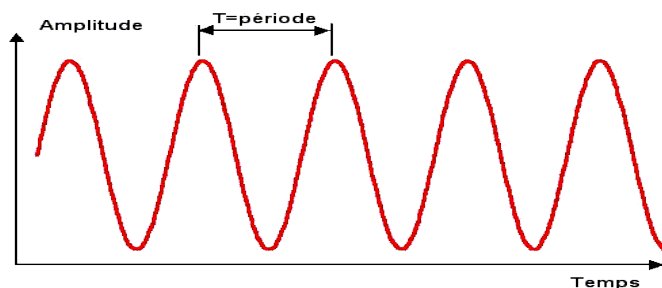


Figure 4.1 : Vibration harmonique

La période d'une vibration harmonique est le temps nécessaire pour revenir à la même situation que le point de départ (figure 4.1). La fréquence est égale à l'inverse de la période $f = 1/T$. La fréquence correspond donc au nombre de fois qu'un phénomène se répète sur une période de temps donnée. [HAR91]

Une vibration harmonique est caractérisée par sa fréquence et son amplitude :

- les fréquences sont mesurées en :

- * Hz : nombre de cycle par seconde
- * CPM : nombre de cycle par minute
- * Ordre : nombre de cycle par révolution

Ordre : nombre de cycle par révolution

- les amplitudes sont mesurées en :

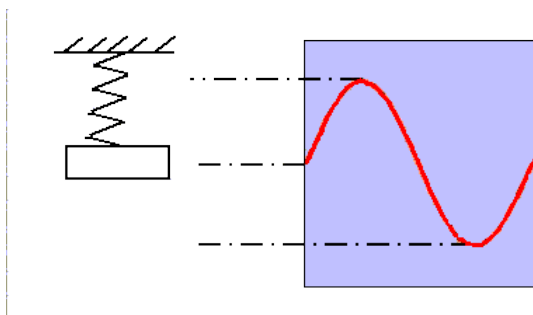
- * pic à pic
- * pic : $1/2 \times \text{amplitude}_{\text{pic à pic}}$
- * RMS : $0.707 \times \text{amplitude}_{\text{pic}}$

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



Figure 4.2 Spectre d'un signal temporel

Une vibration peut se représenter sous diverses formes.



Si l'on observe un système mécanique simple constitué d'une masselotte suspendue à un ressort, on constate que le mouvement de la masselotte se traduit par un déplacement, une vitesse et une accélération.

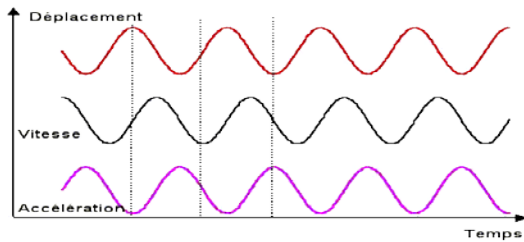


Figure 4.3 : Phase du signal

On remarque sur la figure 4.3 un décalage entre les maxima de chaque sinusoïde. Ce décalage est appelé la phase du signal.

La représentation en **accélération** accentue les hautes fréquences

La représentation en **déplacement** accentue les basses fréquences

La représentation en **vitesse** n'accentue pas les basses et les hautes fréquences.

Il faut également noter qu'il existe une relation mathématique entre déplacement, vitesse et accélération.

$$x(t) = A \sin(2\pi \cdot ft) \tag{4.1}$$

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = 2\pi \cdot fA \cos(2\pi \cdot ft) \tag{4.2}$$

$$\gamma(t) = \frac{d^2x}{dt^2} = -(2\pi \cdot ft)^2 A \sin(2\pi \cdot ft) \tag{4.3}$$

4.5.2 Vibration périodique non harmonique

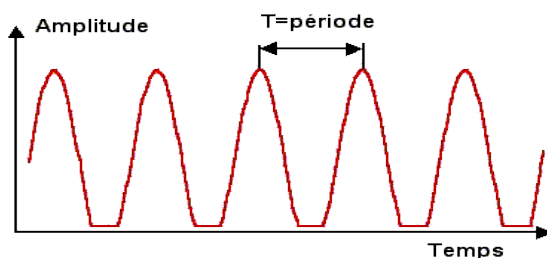


Figure 4.4 : Vibration mécanique non harmonique

La figure 4.4 représente ce que pourrait être une vibration mécanique. Le signal n'est plus parfaitement sinusoïdal, mais la période T est maintenue. Le spectre de ce signal comportera toujours un pic à une fréquence $f=1/T$, mais à cause de l'écrêtage du signal temporel, le spectre présentera un certain nombre de pics étant des multiples entiers de la fréquence de base f. Ces multiples sont appelés des harmoniques de la fondamentale.

4.5.3 Notion de phase

Un signal temporel sinusoïdal peut être obtenu par exemple par un balourd et se répétant donc tous les tours de rotation. Une bande réfléchissante placée sur l'élément tournant envoie un signal une fois par révolution.

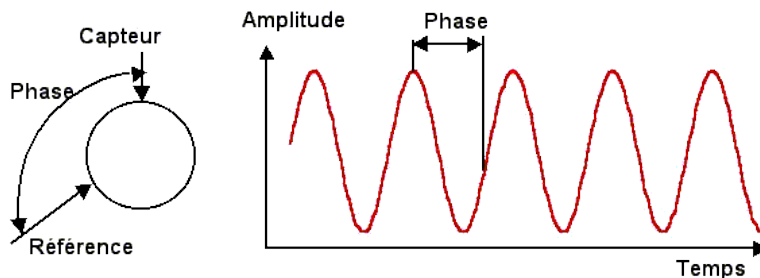


Figure 4.5 : représentation graphique d'une phase

La distance mesurée en degré entre le niveau maximum du signal sinusoïdal et la référence (bande réfléchissante) est appelée la phase. Cette phase est utilisée pour les équilibrages (localisation du point où il faut ajouter les masses d'équilibrage) ou pour détecter certains problèmes particuliers (alignement, résonance...)

Si la différence de phase est égale à 0° , on parle de vibrations en phase. Si au contraire, elle approche les 180° , on parle de vibrations en opposition de phase.

4.5.4 Fréquence

4.5.4.1 Définition

La fréquence 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 :

$$1\text{hertz} = \frac{1\text{ cycle}}{1\text{seconde}} \quad [4.4]$$

Le hertz est la fréquence d'un phénomène périodique dont la période est de 1 seconde.

4.5.4.2 Relation entre fréquence et période

La fréquence f est l'inverse de la période T :

$$f = \frac{1}{T} \quad [4.5]$$

4.5.4.3 Unités

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 :

$$1\text{Hz} = \frac{1\text{CPM}}{60} = \frac{1\text{RPM}}{60} \quad [4.6]$$

Il est intéressant parfois d'exprimer les phénomènes liés à la vitesse de rotation en multiple ou en ordre de la fréquence de rotation. Cette représentation a l'avantage de lier le phénomène vibratoire à une fréquence de référence (généralement la vitesse de l'arbre induisant le phénomène).

4.5.5 Amplitudes

4.5.5.1 Définition

L'amplitude d'une onde 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 (A_{eff}).

Pour un signal de type sinusoïdal :

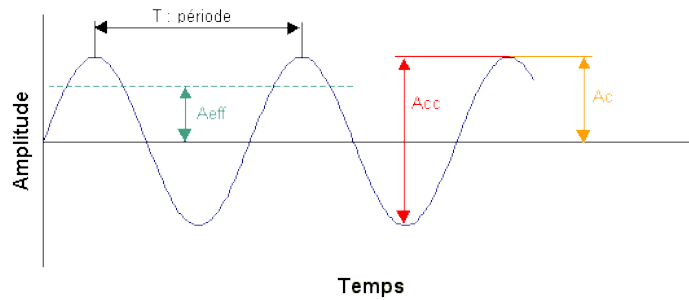


Figure 4.6 : Représentation graphique des différents type d'amplitudes

$$A_{eff} = \frac{A_c \sqrt{2}}{2} = 0.707 A_c \quad [4.7]$$

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 :

$$A_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad \text{avec : } a(t) = \text{amplitude instantané e} \quad [4.8]$$

T = durée d'analyse du signal vibratoire e

4.5.5.2 Grandeurs associées à l'amplitude d'une vibration

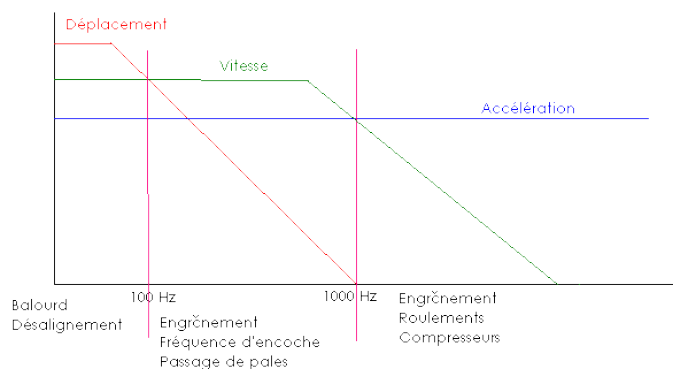


Figure 4.7 : Choix des grandeurs physiques à mesurer

4.5.5.3 Niveau global de vibration

La méthode la plus simple est de mesurer régulièrement la valeur efficace globale des vibrations sur les paliers. Cette technique requiert la mesure de la valeur efficace de la

vitesse de vibration sur une large bande de fréquence (typiquement 1 Hz à 1000 Hz). Ces mesures peuvent être réalisées en utilisant un accéléromètre piézoélectrique et un collecteur de données. Le fonctionnement du capteur piézoélectrique est décrit en annexe et celui du collecteur de données dans les chapitres suivants. Ces mesures sont comparées avec les valeurs limites figurant dans les recommandations internationales comme la norme ISO 10816, utilisée d'ailleurs lors de l'équilibrage du sélecteur mécanique par la société SKF. En reportant les résultats des mesures en fonction du temps, on peut apprécier l'évolution des vibrations et estimer la date de remplacement du roulement.

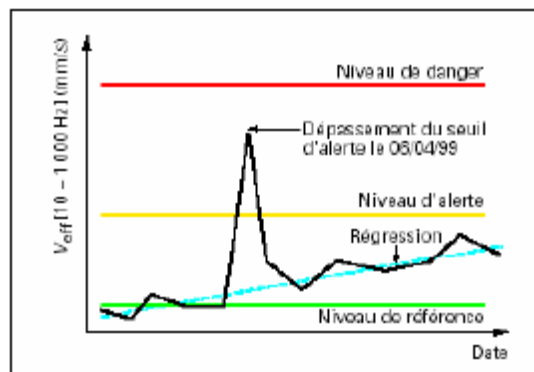


Figure 4.8 - Exemple d'utilisation d'un niveau global

La figure 4.8 illustre l'utilisation d'un niveau global avec l'indicateur vitesse efficace [10-1000 Hz].

Le niveau global utilisé fait apparaître un problème. On évalue sa gravité mais on n'en connaît pas l'origine. Une telle évolution peut cependant être due à l'apparition d'un balourd ou d'un déalignement. Pour trancher entre 2 causes, il est nécessaire de réaliser un diagnostic précis. On fera alors appel à d'autres outils (voir les paragraphes suivants).

Sur une machine comme notre turboalternateur où le niveau vibratoire normal est relativement haut, le développement d'un défaut mécanique peut être masqué par le « bruit de fond ». Le niveau global mesuré ne réagit alors pas à ce défaut, du moins pas à un stade précoce de son développement. La surveillance par niveaux globaux ne peut donc convenir que dans le cadre d'une politique de sécurité. Elle permet de détecter un fonctionnement anormal et de déclencher un arrêt avant la panne des installations.

En aucun cas on ne pourra identifier la cause de ce fonctionnement anormal ni optimiser la maintenance des machines avec un tel outil.

4.5.6 Indicateurs de vibration de type impulsionnel

Pour déterminer l'origine d'une anomalie, Il est intéressant de connaître la nature de la vibration, vibration de type impulsionnel ou non et sa gravité. Les indicateurs utilisant ces propriétés sont principalement le **facteur de crête** et le **kurtosis**. Les mesures effectuées dans la plage de résonance du capteur sont plus spécifiquement utilisées pour la surveillance des chocs de très courtes durées (de type écaillage).

4.5.6.1 Facteur de crête

C'est le rapport entre la valeur de crête et la valeur efficace :

$$\text{Facteur de crête} = \frac{\text{Valeur de crête}}{\text{Valeur efficace}} = \frac{A_c}{A_{eff}} \quad [4.9]$$

Une vibration de type sinusoïdale aura un facteur de crête voisin de 0.707 alors qu'une vibration de type impulsionnel aura un facteur de crête beaucoup plus important [BOU98].

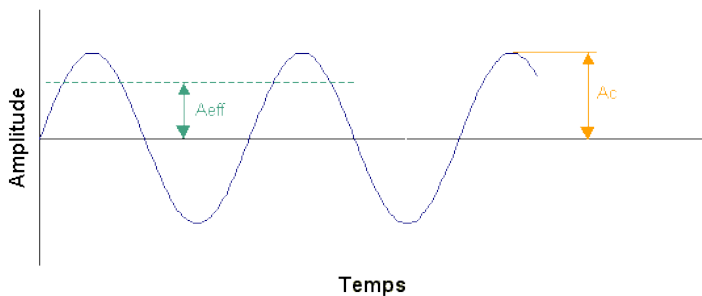


Figure 4.9 : Facteur de crête

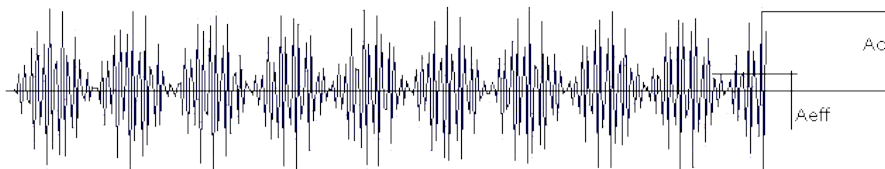


Tableau 4.1 : Facteurs de crête pour différente nature de vibration

Nature des vibrations	Facteur de crête	Causes possibles
Périodique de type sinusoïdal ou complexe ou de type bruit de fond	1.5 à 2.5	Balourd Alignement ...
Aléatoire de type impulsionnel	3 à 4	Roulement en bon état
Périodique de type impulsionnel	> 4	Roulement écaillé

4.5.6.2 Distribution de l'amplitude : kurtosis

Les vibrations de type sinusoïdal ou impulsionnel génèrent des allures de courbes de densité différentes. Le kurtosis, qui quantifie cette différence, est donné par :

$$K = \int_{-x}^{+x} \frac{(x - \bar{x})^4}{\sigma^4} P(x) dx \quad \text{avec } x = \text{amplitude instantané e du signal}$$

[4.10]

\bar{x} = valeur moyenne de x
 $P(x)$ = probabilité é d'apparition de x
 σ = l'écart - type

Concrètement, le kurtosis quantifie l'aplatissement de la courbe de densité de probabilité du signal enregistré. [MAR95].

Tableau 4.2 : Valeur du kurtosis pour différente nature de vibration

Nature des vibrations	Valeur du kurtosis
Sinusoïdale	1.5
Impulsionnel aléatoire	3
Impulsionnel périodique	Élevé

4.5.6.3 Mesure dans la plage de résonance du capteur

Appelées parfois mesures des ondes de chocs, elles sont dédiées à la surveillance spécifique des roulements. Contrairement aux mesures vues précédemment qui sont

effectuées dans la plage de mesure utile du capteur, ces mesures sont effectuées dans la plage de résonance du capteur utilisé.

L'originalité de cette méthode est d'amplifier les vibrations mais aussi de supprimer tous les phénomènes basses fréquences

4.5.7 Modulation et battement

La modulation d'un signal peut être décrite comme étant la variation périodique de l'amplitude d'un signal en fonction du temps [BIG95].

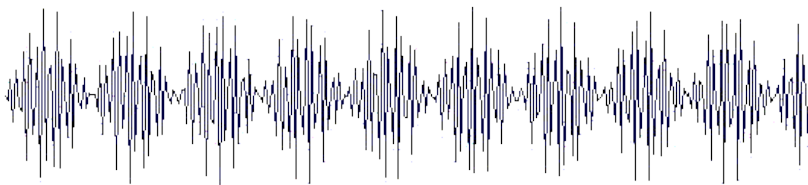


Figure 4.10 : Variation périodique de l'amplitude

Une modulation peut avoir deux origines :

- superposition de deux vibrations dont la différence de fréquence est faible
- vibration de fréquence fixe dont l'amplitude n'est pas constant e dans le temps.

4.5.7.1 Modulation de fréquence

La vibration résultante est la superposition de deux vibrations dont les fréquences propres sont légèrement différentes. L'amplitude du signal résultant est maximale lorsque l'amplitude des deux vibrations est maximale et l'amplitude du signal résultant est nulle lorsque l'amplitude des deux vibrations est nulle ou en opposition de phase.

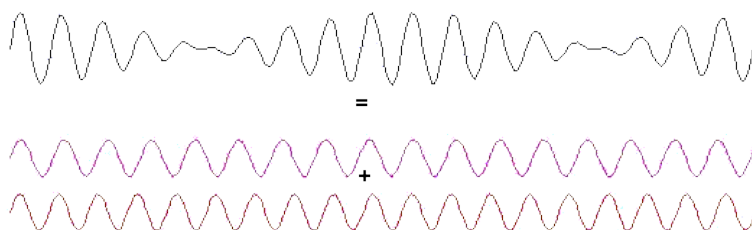


Figure 4.11 : Somme de deux vibration

La vibration résultante est donnée par la fonction mathématique :

$$A_1 \sin(2 \pi f_1 t) + A_2 \sin(2 \pi f_2 t) \xrightarrow{\text{avec}} f_2 \approx f_1 \quad [4.11]$$

Comme les deux fréquences sont proches l'une de l'autre, les mesures spectrales faites à haute résolution permettront de retrouver ces deux fréquences.

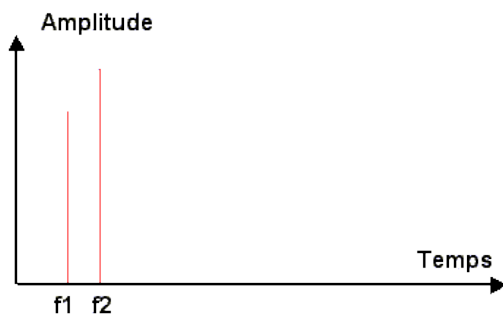


Figure 4.12 : Amplitude de deux fréquences proche

4.5.7.2 Modulation d'amplitude

La deuxième possibilité de modulation peut être due à une vibration de fréquence constante dont l'amplitude varie en fonction du temps, par exemple une fréquence d'engrènement modulée par l'excentricité d'un des deux arbres. La fréquence d'engrènement sera constante, mais la charge passant devant le capteur variera en fonction du déphasage entre l'excentricité et le capteur.

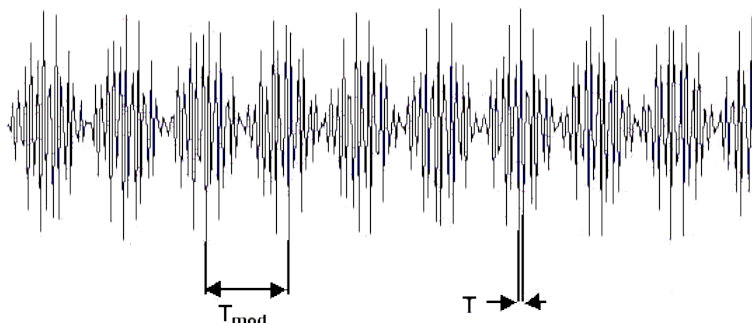


Figure 4.13 : Possibilité de modulation avec déphasage

Le signal vibratoire est donné par la fonction mathématique :

$$(A_{cte} + A_{mod} \sin(2 \pi f_{mod} t)) \sin(2 \pi f t) \quad [4.12]$$

Cette fonction peut également s'écrire :

$$A_{cte} \sin(2 \pi f t) + \frac{A_{mod}}{2} [\cos 2 \pi (f - f_{mod}) t - \cos 2 \pi (f + f_{mod}) t] \quad [4.13]$$

On voit clairement que cette fonction est l'addition d'une composante f et de deux composantes $f-f_{mod}$ et $f+f_{mod}$. Le signal spectral de cette fonction sera donc

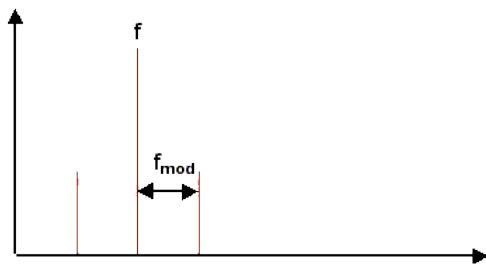


Figure 4.14 : Signal spectral de la fonction modulée

Le tableau ci-dessous illustre les différents types d'analyse en fonction des moyens et des objectifs recherchés.

Tableau 4.3 : Moyens et objectifs tracer en fonction des méthodes d'analyse

Types d'analyse	Moyens	Objectifs
Analyse temporelle	Filtrage, débruitage, traitements statistiques, moyenne, écart type, Kurtosis.	Recherche de chocs et de frottements : phénomènes non périodiques. Evaluation et suppression éventuelle du run out. Représentation de l'évolution de la vitesse de rotation en fonction du temps lors d'une décélération.
Analyse temporelle multi-voies synchronisée	Lissajou multiples	Orbites de l'arbre dans les plans de mesurage, filtrage à la fréquence de rotation et ses premiers harmoniques, positionnement de l'arbre dans le cercle de jeu.

Analyse fréquentielle	Auto-spectre de puissance, fonctions de transfert et de cohérence, détection d'enveloppe, cepstrum	Analyse harmonique, recherche de chocs périodiques. Mesure de phase et de fonctions de transmissibilité.
Analyse d'ordre	Diagramme de Bode et de Nyquist	Analyse de l'évolution de l'amplitude et de la phase d'un paramètre, en fonction de la vitesse de rotation
Analyse en Color-spectrogramme	Auto-spectre de puissance et représentation en cascade	Extraire rapidement les résonances de structure, l'apparition d'un phénomène inconnu lors d'une variation de vitesse
Analyse spécifique	Représentation Polaire, traitements statistiques	Suivi de la position moyenne de l'arbre en fonction d'un paramètre, en fonction du temps et de la vitesse de rotation. Analyse des évolutions des grandeurs surveillées au cours du temps et en régime stationnaire : corrélation et tendance
Analyse temps fréquences	Transformées Fourier court-terme, Ondelettes	Analyse des phénomènes impulsifs, non périodiques
Analyse modale	Logiciel d'analyse modale expérimentale	Connaître les fréquences propres de structure (paliers, conduite, dalle) ou de critique d'arbre sur paliers à roulement.

4.5.8 Configuration des mesures

4.5.8.1 Plage de fréquence et résolution d'un spectre

A - Caractéristiques des mesures spectrales

L'analyse vibratoire doit permettre :

- la détection de la présence d'un défaut,
- la détermination de la gravité et de l'urgence du défaut identifié.

Le suivi des tendances, par l'emploi de bandes étroites spécifiques, permet de mettre en évidence un changement par rapport à la situation de référence, probablement lié à l'évolution d'un défaut.

L'analyse spectrale doit confirmer le type de défaut présent et sa gravité. Le spectre doit donc être configuré de manière qu'il soit possible de mettre en évidence tous les défauts possibles de la machine. Cette configuration doit donc être déterminée en fonction du type de machine analysée.

Les caractéristiques principales d'un spectre qui ne pourront plus être modifiées après la prise de mesure sont :

- la plage de fréquence ou la fréquence maximale,
- la résolution ou la précision de la mesure.

L'unité du spectre, accélération, vitesse ou déplacement, peut généralement être modifiée ultérieurement par l'intermédiaire du logiciel d'analyse. Cette unité, bien qu'importante lors de l'analyse, n'est pas critique au moment de la prise de mesure.

B - Plage de fréquence

La fréquence maximum du spectre doit permettre de mettre en évidence les défauts susceptibles de se développer sur la machine analysée :

- balourd, alignement, jeu,
- roulements,
- dentures sur les réducteurs/multiplicateurs,...

Ces défauts ne se présentent pas tous dans la même plage de fréquence :

- balourd, alignement, jeu : vitesse de rotation et multiples,
- roulements : d'abord en haute fréquence, puis progressivement en moyenne et basse fréquence
- denture : fréquence d'engrènement et multiples...

Pour le suivi des roulements :

- **F_{max} = 60 ordres**. Cette plage couvre la basse et la moyenne fréquence afin de suivre l'évolution des défauts de roulement. La détection précoce des défauts sera assurée par le

HFD. Cette plage convient aux roulements de petites et moyennes dimension pour des vitesses supérieures à 1000 RPM.

- $F_{\max} = 100$ ordres. Cette plage convient aux roulements de grandes dimensions ou pour les vitesses lentes < 1000 RPM.

Pour le suivi des dentures :

- $F_{\max} = 4x$ fréquence d'engrènement. Cette plage ne permet pas toujours de suivre efficacement les défauts de roulement. Il convient alors d'effectuer deux mesures ou d'opter pour un compromis entre les deux configurations.

Pour le suivi des paliers lisses :

- $F_{\max} = 30$ ordres. Cette plage est moins étendue que pour les roulements car il n'y a pas d'éléments en rotation qui génèrent des hautes fréquences.

C - Résolution

La résolution caractérise la précision de la mesure. Une précision élevée est nécessaire s'il faut distinguer deux pics très proche l'un de l'autre, comme par exemple :

- bandes latérales autour d'un pic principal,

- harmonique de la vitesse de rotation ou multiple asynchrone (ordre 6.05 par exemple)

La résolution s'exprime en nombre de lignes spectrales. Pour un spectre donné, c'est une valeur unique : 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400 lignes.

La précision de la mesure est donnée par la formule :

$$\text{Précision} = \frac{F_{\max}}{N^{\text{bre}} \text{ de ligne}} \quad [4.14]$$

Pour les arbres tournant aux vitesses suivantes :

Tableau 4.4 : Précision de mesure en fonction de la vitesse

Vitesse < 2000 RPM	1600 lignes
2000 RPM < Vitesse < 4000 RPM	3200 lignes
Vitesse > 4000 RPM	6400 lignes

4.5.9 Durée de mesure pour un spectre

Le calcul du temps de mesure pour un spectre est très proche de celui effectué pour le signal temporel.

Le nombre de lignes de résolution voulues pour le spectre détermine le nombre d'échantillons nécessaires pour calculer le spectre. La fréquence maximale désirée détermine la fréquence d'échantillonnage

$$\text{Durée du spectre} = \Delta T = \frac{2.56 N^{\circ} \text{lignes}}{f_{\text{échantillon}}} = \frac{N^{\circ} \text{lignes}}{f_{\text{max}}} \quad [4.15]$$

avec N° lignes : résolution du spectre (400,800,1600,3200).

Cette durée est une donnée physique et ne dépend donc pas de la vitesse de mesure de l'appareil d'acquisition. Le collecteur de données influence aussi le temps nécessaire pour calculer le spectre à partir du signal temporel. Un temps de calcul trop long intervenant entre deux acquisitions consécutives a pour conséquence une perte d'informations contenues dans le signal analogique mesuré.

Cette limitation de l'appareil s'appelle le Real Time Rate (ou taux de calcul en temps réel) d'un analyseur, et est la fréquence maximale mesurable pour laquelle le temps de calcul est inférieur ou égal au temps de mesure (pas de pertes de données entre deux moyennes consécutives).

Pour le calcul de la durée totale d'une mesure, il ne faut pas oublier de tenir compte du nombre de moyennes et du pourcentage de recouvrement entre moyennes successives (Data Overlap).

$$f_{\text{max}} < \text{RTR} \longrightarrow \text{pas de perte de données liée au calcul : temps réel}$$

$f_{max} > RTR \longrightarrow$ perte de données : temps de calcul > temps de mesure

A - Les bandes étroites

Les équipements modernes permettent en général de définir entre 6 et 12 bandes de fréquences étroites permettant de suivre des défauts mécaniques spécifiques. A chaque bande étroite, un seuil d'alarme spécifique peut être attribué, en fonction de l'énergie susceptible d'être générée par le défaut concerné.

Tableau 4.5 : seuils d'alarme en basse et haute fréquence

			F r é q u e n c e	
Description	Unité	Type	Basse	Haute
Haute fréquence	HFD	Hz v.HFD	2000	20000
Temporel pic à pic	DFLTU	P-P Wave		
Facteur de crête	DFLTU	Crest		
Sub-harmonique	Vitesse	ORD Int.	0.2	0.8
Balourd : 1xRPM	Vitesse	ORD Int.	0.8	1.2
Alignement : 2-3xRPM	Vitesse	ORD Int.	1.2	3.5
Jeu : 4-7xRPM	Vitesse	ORD Int.	3.5	7.5
Roulement 1 : 8-20xRPM	Vitesse	ORD Int.	7.5	20
Roulement 2 : 20-60xRPM	Vitesse	ORD Int.	20	60
Optionnelles				
ISO 2372 / VDI 2056	Vitesse	Hz Int.	10	1000
1x engrènement (par ex. 80 dents)	Vitesse	ORD Int.	75	85
2x engrènement	Vitesse	ORD Int.	155	165

Chaque bande est programmée pour suivre un défaut spécifique. Cependant, en fonction des caractéristiques de la machine contrôlée, il est possible que plusieurs défauts d'origines différentes soient susceptibles de déclencher une alarme.

B - Haute fréquence

Cette unité a été développée afin de suivre l'énergie haute fréquence émise par des défauts de roulements dans un stade précoce et des problèmes de graissage.

Les niveaux mesurés sont sensibles au mode de fixation du capteur. Sur les multiplicateurs de vitesse, l'énergie de cette plage peut être influencée par une fréquence d'engrènement et/ou un de ses multiples.

C - Temporel pic à pic

La valeur pic à pic du signal temporel quantifie l'amplitude des impacts présents dans le signal. Des amplitudes élevées peuvent traduire l'apparition :

- défaut de roulement,
- jeu dans un roulement, sur l'arbre ou dans un accouplement,
- denture cassée ou écaillée.

D - Facteur de crête

Le facteur de crête caractérise le type d'impact présent dans le signal temporel. Des valeurs élevées peuvent se traduire par :

- écaillage sur une piste de roulement
- dents cassées et/ou écaillées dans un réducteur

E - Sub-harmonique

L'énergie sub-harmonique est celle située sous 1xRPM. Des niveaux élevés peuvent se traduire par :

- défaut de cage dans un roulement (0.4xRPM en général)
- défaut de courroies
- vitesse de rotation de la machine entraînée (tension de courroie trop élevée par exemple)

F - Balourd 1xRPM

Des niveaux élevés dans cette plage de fréquence peuvent traduire l'apparition :

- d'un balourd sur l'arbre contrôlé,
- défaut d'alignement angulaire,
- défaut électrique dans le rotor
- jeu structurel ou résonance

G - Alignement 2-3xRPM

Des niveaux élevés dans cette bande de fréquence peuvent traduire l'apparition :

- défaut d'alignement,
- jeu dans le roulement (doit être accompagné de multiples supérieurs 4-7xRPM)
- dans le cas d'un moteur 3000 tours, 2x la fréquence d'alimentation (pied bancal)
- vitesse de la machine entraînée (tension de courroies trop élevées par exemple)

H - Jeu 4-7xRPM

Des niveaux élevés dans cette plage de fréquence peuvent traduire l'apparition :

- défaut d'alignement,
- jeu dans le roulement,
- dent cassée provoquant beaucoup de multiples de la vitesse de rotation,
- dans le cas d'un moteur 1500 tours, 2x la fréquence d'alimentation
- vitesse de rotation de la machine entraînée (tension de courroies trop importante par exemple)

Dans le cas d'un moteur alimenté via un variateur, le double de la fréquence d'alimentation ainsi que ses harmoniques peuvent être présentes sans pour cela traduire un défaut électrique.

Dans le cas d'un réducteur à plusieurs trains, une fréquence d'engrènement peut se trouver dans cette plage de fréquence.

I - Roulement 1 8-20xRPM

Des niveaux élevés dans cette plage de fréquence peuvent traduire l'apparition :

- défaut de roulement dans un stade avancé,
- dégradation des aubes/pales sur une pompe/un ventilateur modulé par la vitesse de rotation de l'arbre

La fréquence de passage des aubes/pales est souvent présente sans pour cela traduire un défaut.

Dans le cas d'un réducteur à plusieurs trains, une fréquence d'engrènement peut se trouver dans cette plage de fréquence.

J - Roulement 2 20-60xRPM

Des niveaux élevés dans cette plage de fréquence peuvent traduire l'apparition :

- défaut de roulement dans un stade de dégradation établi,
- dégradation de la denture modulée par la vitesse de l'arbre.

K - ISO 2372 / VDI 2056

Cette plage de fréquence (10 à 1000 Hz) est imposée par la norme et représente un niveau global de vibration qu'une machine ne devrait pas dépasser. Ce niveau est déterminé en fonction de la taille de la machine (tableau 4.6).

L - 1x engrènement et harmoniques

Cette bande de fréquence a pour but de suivre l'état de la denture d'un réducteur. Ce type de bandes doit être défini spécifiquement pour chaque réducteur (fonction du nombre de dents).

L'amplitude de la fréquence d'engrènement varie en fonction de la charge, de la forme de la denture, des fluctuations de vitesse... Un niveau élevé ne traduit pas obligatoirement un défaut de denture.

4.5.10 Les seuils d'alarme

La définition des seuils d'alarme se fait soit par la norme ISO 2372, soit par expérience. La norme ne donne qu'un ordre de grandeur car elle ne tient pas compte du type de machine et des conditions de fonctionnement. Sans expérience, il est possible de se fixer une alarme sur la variation de niveau mesurée entre la première et la dernière mesure (une multiplication par deux du niveau reflète généralement d'un début de dégradation), [PEUG01].

Avec une bonne expérience, la meilleure méthode consiste à fixer deux seuils d'alarme :

- un seuil de dégradation,
- un seuil d'intervention obligatoire.

A - les seuils d'alarme en basse et moyenne fréquence**Tableau4.6 : Norme ISO 2372 / VDI 2056 - Mesure de 10 à 1000 Hz**

Non acceptable au-delà			
4.5 mm/s RMS	7.1 mm/s RMS	11.2 mm/s RMS	18 mm/s RMS
1.8 mm/s RMS	2.8 mm/s RMS	4.5 mm/s RMS	7.1 mm/s RMS
0.71 mm/s RMS	1.12 mm/s RMS	1.8 mm/s RMS	2.8 mm/s RMS
Groupe K(classe I)	Groupe M (classe II)	Groupe G (classe III)	Groupe T(classe IV)

Groupe K : petite machine jusqu'à 15 kW,

Groupe M : machine moyenne entre 15 et 75 kW. Jusqu'à 300 kW si fondation spéciale,

Groupe G : grande machine sur fondation rigide et lourde dont la fréquence propre > vitesse de rotation

Groupe T : grande machine dont la fréquence propre de la fondation > vitesse de rotation

Tableau 4.7 : Seuil d’alerte et d’alarme en % de la norme

			Seuils en % de la norme	
Description	Unité	Type	Alerte	Alarme
Sub-harmonique	Vitesse	RMS	40%	40%
Balourd	Vitesse	RMS	80%	80%
Alignement	Vitesse	RMS	60%	60%
Jeu	Vitesse	RMS	40%	40%
Roulement 1	Vitesse	RMS	30%	30%
Roulement 2	Vitesse	RMS	20%	20%
Optionnelles				
ISO 2372 / VDI 2056	Vitesse	RMS	100%	100%
1x engrènement	Vitesse	RMS	80%	80%
2x engrènement	Vitesse	RMS	60%	60%

B - Les seuils d'alarme en haute fréquence

En haute fréquence, l'unité appropriée est l'accélération et la norme ISO2372 n'est pas adaptée à cette unité. Le tableau ci-dessous est une proposition de niveaux, en fonction de la vitesse de rotation et du diamètre de l'arbre (ou du type de roulement).

Tableau 4.8 : seuils d’alerte et d’alarme en valeur absolu

			Seuils en valeur absolue	
Description	Unité	Type	Alerte	Alarme
Haute fréquence	HFD	Crête ou pic	0.6	0.4
Temporel pic à pic	Accélération	Pic-Pic	2	2
Facteur de crête	N/A	N/A	6	8

Tableau 4.9 : Seuils d'alarme en accélération pour les paramètres hautes fréquences

Vitesse ->	300 RPM		1000 RPM		2000 RPM		4000 RPM	
diamètre arbre	Alerte	Alarme	Alerte	Alarme	Alerte	Alarme	Alerte	Alarme
xxx05 / Ø 25	0.06	0.21	0.35	1.1	0.77	2.5	2.1	6.6
xxx20 / Ø 100	0.17	0.5	0.9	2.8	2.1	6.4	5.6	17
xxx40 / Ø 200	0.3	0.9	1.6	5.0	3.4	10.0	N/A	N/A
xxx80 / Ø 400	0.45	1.4	2.4	7.6	N/A	N/A	N/A	N/A

4.5.11 Instrumentation

4.5.11.1 Les capteurs de vibration

Il existe plusieurs types de capteurs pour apprécier les mouvements vibratoires qu'on peut diviser en deux grandes familles, mesures de vibrations et contrôle industriel. La sensibilité des capteurs représente la proportionnalité de la sortie électrique exploitable (tension, charge, courant) par rapport au paramètre de vibration (accélération, vitesse, déplacement). Elle s'exprime en terme de : sortie électrique / paramètre de vibration.

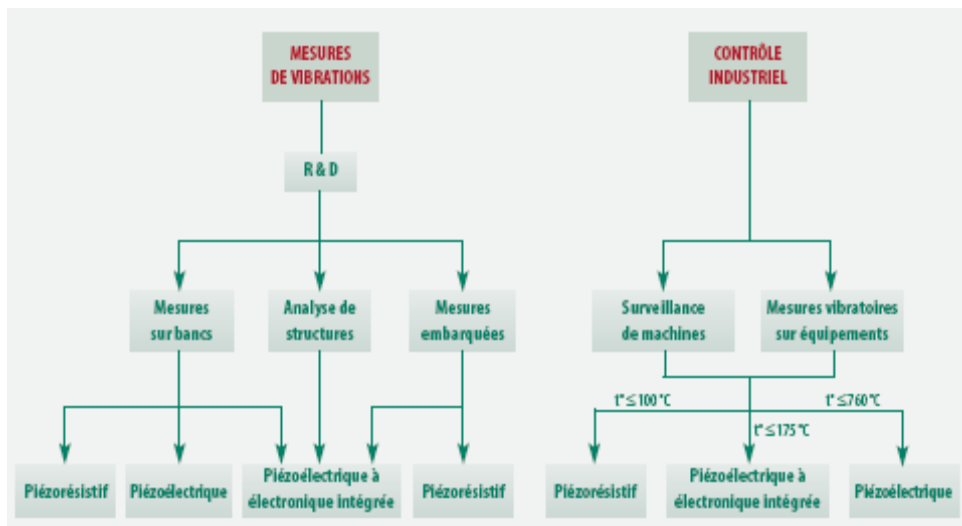


Figure 4.15 : Différents type de capteur de vibration

A - Sonde de proximité à Courant de Foucault

Ce type de capteur ne mesure que les déplacements vibratoires relatifs. Cette sonde a une réponse aux déplacements quasi-statiques, mais a une dynamique limitée et elle nécessite souvent un calibrage sur site. De plus, la surface vibrante doit être électriquement conductrice. Une faible impédance de sortie derrière le démodulateur autorise l'emploi de grandes longueurs de câble. Ce type de capteurs est souvent monté d'origine sur les groupes turboalternateurs à paliers lisses.

Avantages :

- mesure sans contact
- mesure en continu (il existe un signal pour une fréquence nulle)
- mesure réelle du déplacement de l'axe dans son logement robuste

Inconvénients :

- sensible aux hautes fréquences
- la qualité de mesure dépend de la qualité de la surface
- problèmes d'implantation
- la phase relative des vibrations de l'arbre et du palier influence la mesure.

B - Sonde capacitive

Ce capteur de petite dimension est libre de tout contact. Ce capteur sensible aux déplacements vibratoires relatifs a une grande sensibilité et est opérationnel sur une large gamme fréquentielle. Les inconvénients sont que la surface de vibration doit être électriquement conductrice, que la gamme dynamique de la sonde est très limitée et que la sonde est difficile à calibrer. Il faut appliquer une différence de potentiel entre la sonde et la pièce en mouvement.

C - Potentiomètre de position

Peu coûteux et de faible impédance, ce capteur est capable de mesurer les déplacements statiques. Cependant, les gammes dynamiques et fréquentielles sont très limitées et le capteur a une courte durée de vie et une faible résolution.

D - Bobine mobile

C'est un capteur de vitesse vibratoire de faible impédance électrique. Il est très limité dans ses gammes dynamiques et fréquentielle (au dessus de la fréquence de résonance de suspension). Il est sensible aux champs magnétiques et est affecté par son orientation.

Avec ses éléments mobiles, il est sujet à une dégradation de ses spécifications initiales. Sa plage fréquentielle va typiquement de # 10 Hz à 2 000 Hz.

E - Vélocimètre Laser à effet Doppler

C'est un capteur de vitesse relative s'appuyant sur un faisceau laser qui est envoyé vers la cible et dont la fréquence est modulée par la vibration de la surface atteinte.

Les avantages sont nombreux :

- pas de préparation de la surface
- pas de masse rajoutée
- possibilité de scruter plusieurs centaines ou milliers de points en des temps très réduits

Mais l'inconvénient majeur reste son prix (> 130 kF) et une plage de mesure qui n'atteint encore pas celle offerte par une chaîne accélérométrique.

F - Capteur piézorésistif

Un capteur d'accélération vibratoire capable de mesurer les accélérations quasi-statiques. Les gammes de mesure, fréquentielle et dynamique, peuvent être larges. Sa résistance limitée contre les chocs en fait un capteur vulnérable. L'amortissement visqueux est nécessaire pour le protéger des chocs. Cependant, ceci amène à une compression de la gamme thermique de fonctionnement et altère les caractéristiques de phase.

De nouvelles technologies de micro-usinage améliorent les performances de tels capteurs.

G - L'accéléromètre piézo-électrique

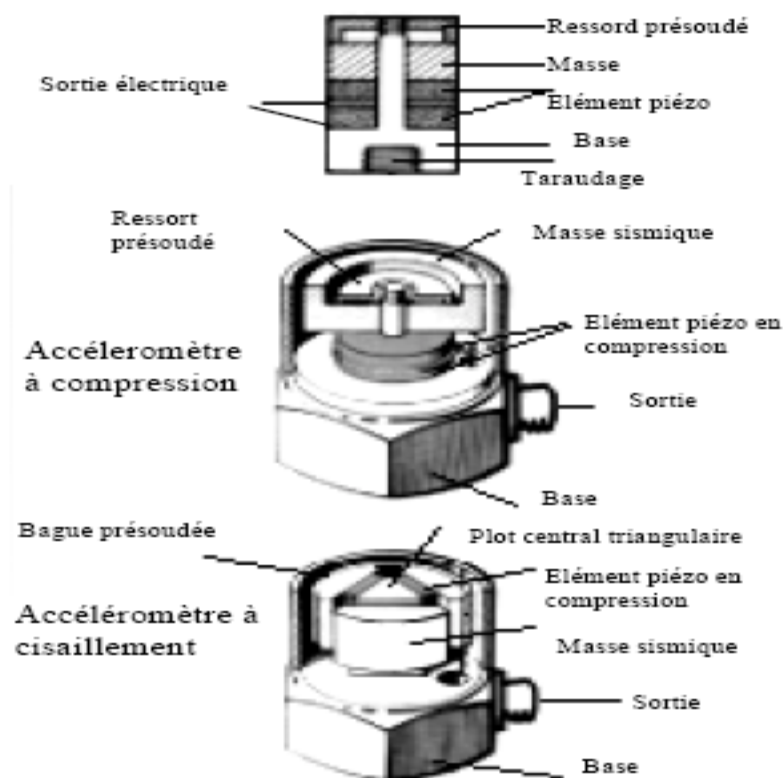
Il est unanimement considéré comme le meilleur capteur disponible à ce jour pour les mesures de vibrations absolues. Il possède les propriétés suivantes :

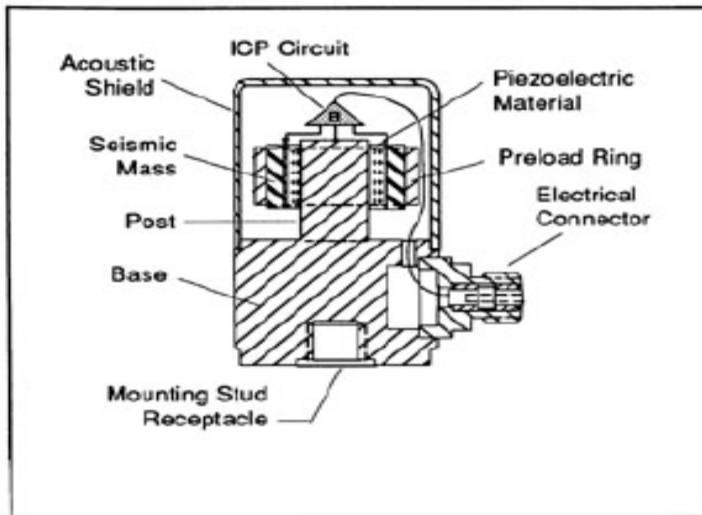
- Utilisable sur de très grandes gammes fréquentielles
- Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement 140 dB, soit 1 à 108).
- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse
- Les mesures de vibration peuvent être faites sous large éventail de conditions environnementales tout en conservant une excellente précision (typiquement 250°C ; 400°C à 700°C pour des modèles spéciaux).

- Etant lui-même générateur de charges, il est donc indépendant de toute alimentation externe.
- Nécessite malgré tout un conditionnement de sa sortie charge (appelé conditionneur de charge ou préamplificateur de charge) plus coûteux que pour les autres types de capteur.
- Aucun élément mobile, donc extrêmement durable.
- Extrêmement compact et d'un grand rapport qualité/prix.
- Ne passe pas la composante statique
-

Fonctionnement des accéléromètres piézo-électriques avec ou sans électronique intégrée

La figure suivante montre différents modes de conception d'accéléromètres piézoélectriques





Vue en coupe

Figure 4.16 : Vue en coupe des accéléromètres

Le principe de fonctionnement est celui d'un système masse ressort amortisseur.

Sous la fréquence de résonance, la masse applique une force à l'élément piézo-électrique proportionnelle à l'accélération subie par l'embase du capteur. Le comportement est extrêmement linéaire sur une très grande plage de niveaux.

La gamme dynamique des accéléromètres piézo-électrique est limitée :

! Aux basses fréquences et aux faibles niveaux par la technologie du capteur (cisaillement ou compression et par le bruit de fond de l'électronique.) et

! Aux hautes fréquences et aux niveaux élevés par la masse de l'accéléromètre, par la non linéarité entre la sortie de charge ou de tension et l'accélération physique générée. Egaleme nt, la limite supérieure est donnée par la solidité structurelle de l'accéléromètre.

Le principe de fonctionnement est celui d'un système masse-ressort-amortisseur.

Sous la fréquence de résonance, la masse applique une force à l'élément piézo-électrique proportionnelle à l'accélération subie par l'embase du capteur. Le comportement est extrêmement linéaire sur une très grande plage de niveaux.

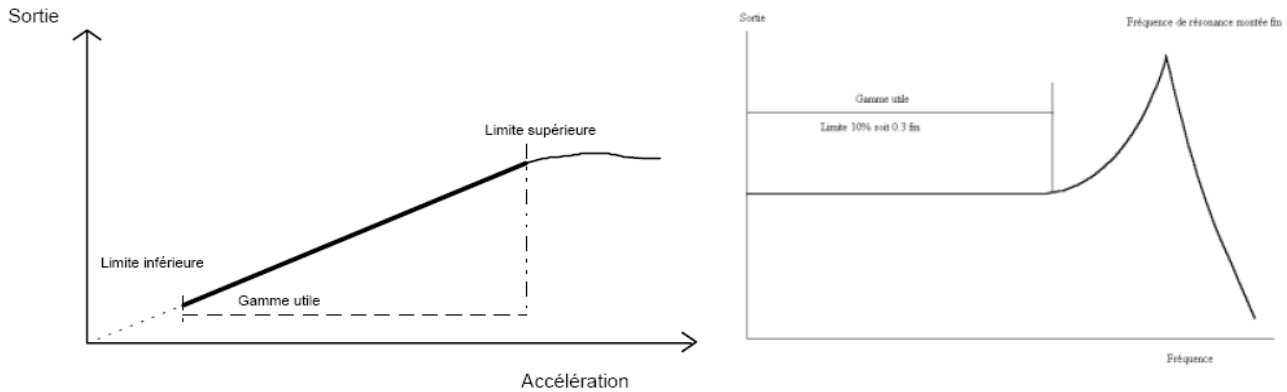


Figure 4.17 : Limites de choix des accéléromètres

La sensibilité d'un accéléromètre piézo-électrique s'exprime en pC/m/s² ou en pC/g, celle des accéléromètres à électronique intégrée en mV/m/s² ou en mV/g.

H - L'accéléromètre à électronique intégrée

Il est semblable à l'accéléromètre piézo-électrique à la différence qu'il possède de manière intégrée un conditionnement de charge représenté par un composant de type MOSFET [COU02]. Il possède les mêmes propriétés que l'accéléromètre piézo-électrique à l'exception de :

- Il est plus limité en température d'utilisation du fait de l'électronique intégrée (# 125°C) ;
- Il nécessite une alimentation à courant constant toutefois moins onéreuse qu'un conditionneur de charge. Le câble de liaison avec l'instrument de mesure possède deux fils comme le piézo pur. Le fil chaud transporte l'alimentation à courant constant et la modulation de tension proportionnelle à l'accélération de la surface vibrante. Une capacité sépare le signal continu de l'alimentation du signal dynamique reflet de la vibration ;
- Il a une sortie à basse impédance qui autorise de plus grande longueur de câble ;
- Dynamique de l'électronique intégrée un peu plus faible que dans le cas d'une électronique déportée ;
- Pas de réglages pour les filtres passe-haut et passe-bas.



Figure 4.18 : Exemple d'accéléromètre à électronique intégrée

4.5.11.2 Réponse en fréquence

Il faut s'assurer en choisissant un accéléromètre que la gamme de fréquence couvre la gamme de mesure désirée (en général entre 2Hz et 10KHz).

Ces capteurs sont limités en basse fréquence par :

- la fréquence de coupure de l'amplificateur (< 1Hz)
- les fluctuations de température peuvent influencer ces capteurs en basse fréquence

Ces capteurs sont limités en haute fréquence par :

- la fréquence de résonance du capteur. La limite haute fréquence du capteur est fixée à 1/3 de sa fréquence de résonance.

Tableau 4.10 : Principales caractéristiques des capteurs

	Capacitif	Piézo- électrique	Piézo-résistif	Asservi
Dimension	Moyens	Faibles	Faibles	Moyens
Gamme de température	Moyens	Elevé	Moyens	Moyens
Sensibilité aux faibles niveaux	Moyens	Moyens	Faibles	Elevé
Coût	Moyens	Faibles	Elevé	Elevé
Echelle de mesure	Limitée	Très large	Large	Limitée

Résistance aux chocs	Très élevée	Très élevée	Moyenne	Faible
T°C max d'utilisation	basse	élevée	basse	moyenne
Sensibilité à la t°C	Faibles	Moyens	Moyens	Faibles

4.5.11.3 Position de montage

L'accéléromètre devrait être monté de telle façon que la direction de mesure désirée coïncide avec l'axe de sensibilité principal. Les accéléromètres sont légèrement sensibles aux variations transversales mais cela peut être négligé puisque la sensibilité transversale est < à 1% de celle de l'axe principal.

La position de mesure sur un objet sera généralement dictée par la raison pour laquelle on fait la mesure.

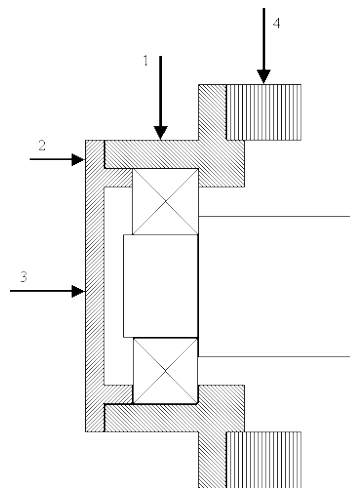


Figure 4.19 : Position de montage des capteurs

Sur le boîtier de roulement schématisé ci-contre, les accéléromètres ont été placés en vue d'assurer un trajet direct des vibrations provenant du roulement. Il est évident que les positions 1 et 2 sont les meilleures.

4.5.11.4 Montage de l'accéléromètre

La méthode de montage de l'accéléromètre sur la surface de mesure est l'un des facteurs le plus critique pour l'obtention de résultats exacts à partir de mesures de vibrations pratiques.

Le type d'assemblage du capteur et de la surface influence la fréquence de résonance de l'assemblage :

Tableau 4.11 : Fréquence de résonance pour différents type de montage

Type de montage	Fréquence de résonance (KHz)
Goujon fileté	31
Collage par cire d'abeille	29
Colle époxy ou cyanoacrylate	28
Goujon isolé ou rondelle de mica	28
Aimant permanent	7
Point de touche	2

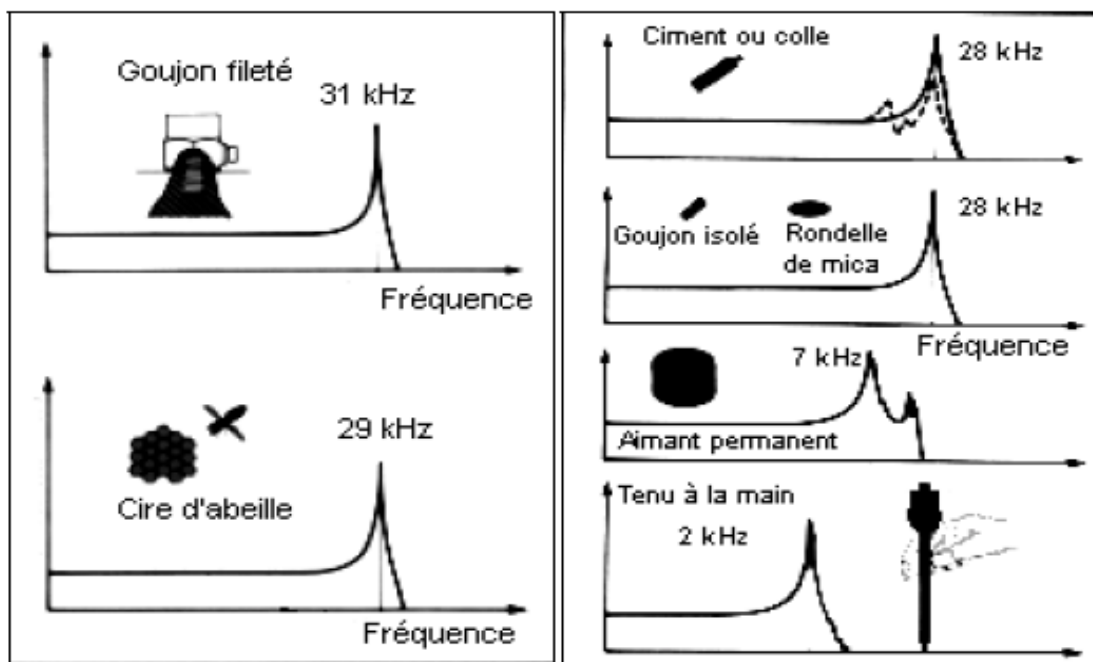


Figure 4.20 : Méthodes de montage des accéléromètres

4.6 Les outils de l’analyse vibratoire.

4.6.1 La chaîne d’acquisition.

Cette chaîne de mesure est le maillon indispensable de l’analyse vibratoire pour l’acquisition des signaux à étudier. Le capteur d’accélération a pour rôle de transformer les vibrations mécaniques en signaux électriques. L’amplificateur va ensuite augmenter son intensité afin de pouvoir traiter le signal. Les limitations dans la plage de fréquences sont

réalisées grâce à des filtres « passe haut » et « passe bas » comme le montre la figure (4.21).

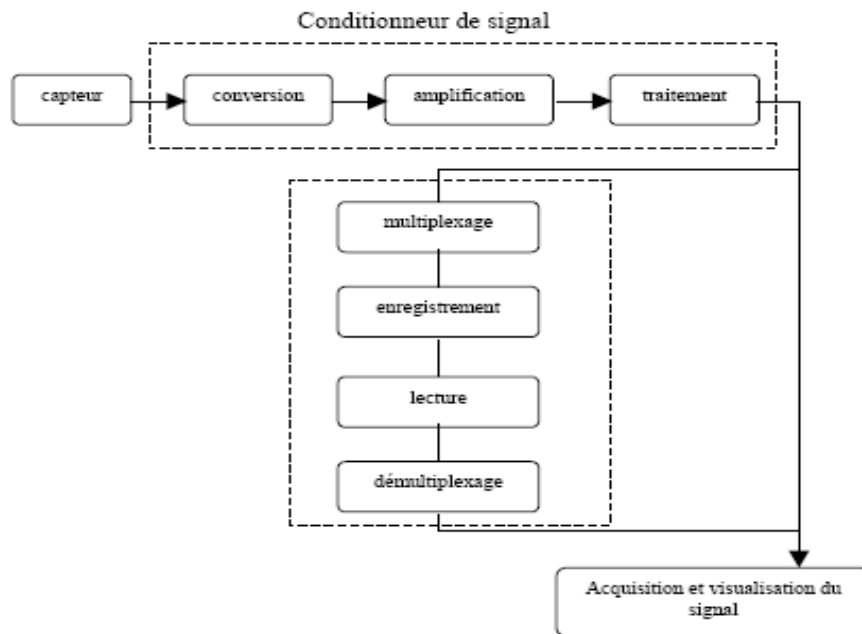


Figure4.21 : Acquisition et visualisation du signal

4.6.2 Le matériel d'analyse

Le choix du matériel utilisé est essentiellement défini par les différents types d'analyses que l'on doit effectuer et le nombre de voies à acquérir simultanément.

L'analyseur de spectres « multivoies » est l'outil de base de traitement du signal à des fins de diagnostic. On trouve également d'autres types de matériel tels que les collecteurs de données qui sont dédiés à la surveillance des machines en milieu industriel. Ceci se justifie par l'importance de l'analyse des mouvements de paliers et de leurs réponses impulsionnelles. [SIG01]. La représentation des déformées modales et des déformées en fonctionnement sont aussi un atout essentiel pour l'aide au diagnostic. La difficulté majeure réside dans le choix des outils à mettre en oeuvre. Ils sont conditionnés par :

- la cinématique de la machine
- sa dynamique
- la structure même de la machine
- les niveaux de criticité de la machine

4.6.2.1 Analyseur numérique

Un analyseur numérique comprend toujours un accéléromètre et un amplificateur analogique, mais le signal en sortie de ce dernier est converti sous forme numérique et toutes les opérations d'analyse se font numériquement. On dispose ainsi d'analyseurs de Fourier, dont les résultats sont comparables à un ensemble de filtres à bande étroite étagés régulièrement en fréquence. Le plus souvent, on applique un algorithme dit Transformée Rapide de Fourier. On dispose aussi de filtres numériques récurrents normalisés permettant l'analyse par fraction d'octave.

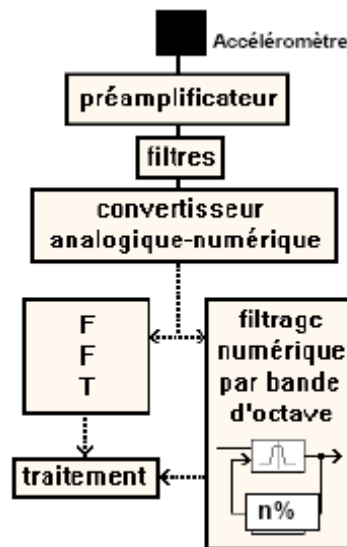


Figure 4.22 : Analyseur numérique

4.6.2.2 Collecteur de données

La surveillance repose sur la mesure et l'analyse permanente ou périodique de données de la machine en fonctionnement. La collecte et le traitement de ces informations nécessitent de disposer des outils adaptés à cet effet.

La surveillance périodique des machines tournantes a pris un essor considérable avec l'arrivée d'une nouvelle génération d'appareils qui sont des capteurs intelligents: les collecteurs de données informatisés (figure 4.23).

L'adjonction à un instrument de mesures d'un convertisseur analogique numérique, d'une mémoire de stockage et d'une interface permettant la communication avec un micro-ordinateur a révolutionné la surveillance des machines.

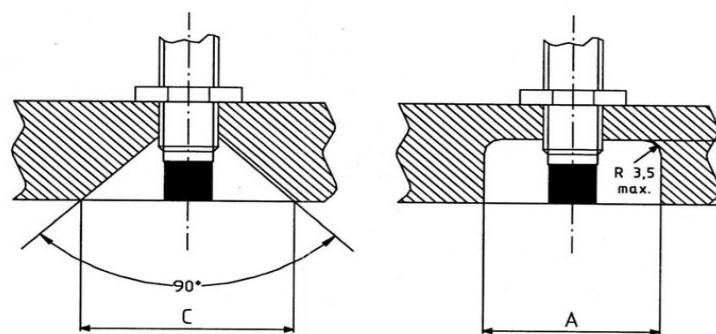


Figure 4.23 : Collecteur de données Bruel & Kjaer –Schenck CMS

C'est l'outil, tout au moins dans ses principes, dédié à la surveillance périodique des machines tournantes.

4.6.3 Capteur : accéléromètre Piézo-électrique

Le capteur piézo-électrique et le conditionneur de signal sont les deux maillons de base de toute chaîne de mesure dans un système de surveillance ou de diagnostic par analyse vibratoire. Sa dynamique de mesure et sa bande passante très étendue font de l'accéléromètre Piézo-électrique le capteur le mieux adapté pour l'analyse de vibrations absolues de paliers.



Transducer Type	Minimum value for full measuring range (mm)			Minimum value for half measuring range (mm)	
	A	B	C	D	E
TQ 401	20	9	30	16	6
TQ 402/412	34	13	46	24	10
TQ 403	70	23	130	54	10

Figure 4.24 : Exemple de fixation des accéléromètres

4.6.4 Choix des points de mesures

L'implantation de l'accéléromètre sur les machines est très importante. Chaque campagne de mesures doit être effectuée en des points précis qui doivent rester toujours les mêmes. En effet, un phénomène mécanique peut donner des images vibratoires sensiblement différentes en fonction du point de mesure. Certains défauts induisent des forces d'excitation *directionnelles* (radiales ou axiales) qui ne seront révélées que si le capteur est correctement positionné.

On essaiera toujours de rapprocher les points de mesure des paliers. Cela permet d'obtenir les images les plus fidèles des défauts mécaniques (bande passante de la chaîne d'acquisition maximale, amortissement minimisé). Pour avoir une image complète des vibrations (en trois dimensions), il faut prendre les mesures selon trois directions perpendiculaires sur chaque palier de la machine surveillée : deux directions radiales (horizontale et verticale) et une direction axiale (figure 4.25).

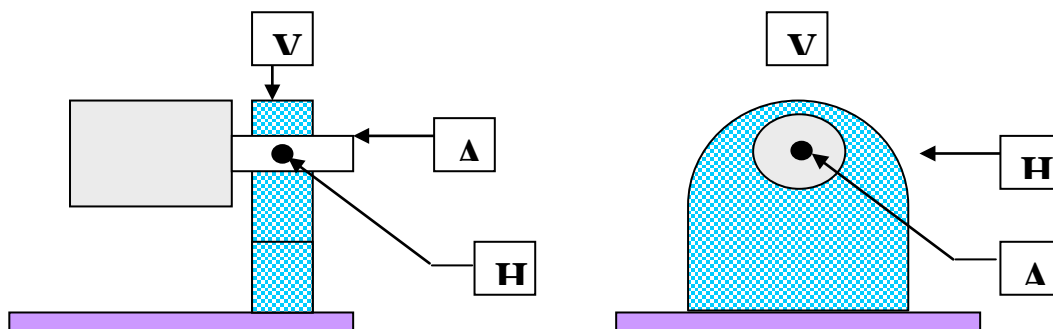


Figure 4.25 : Les trois directions de mesure pour chaque palier

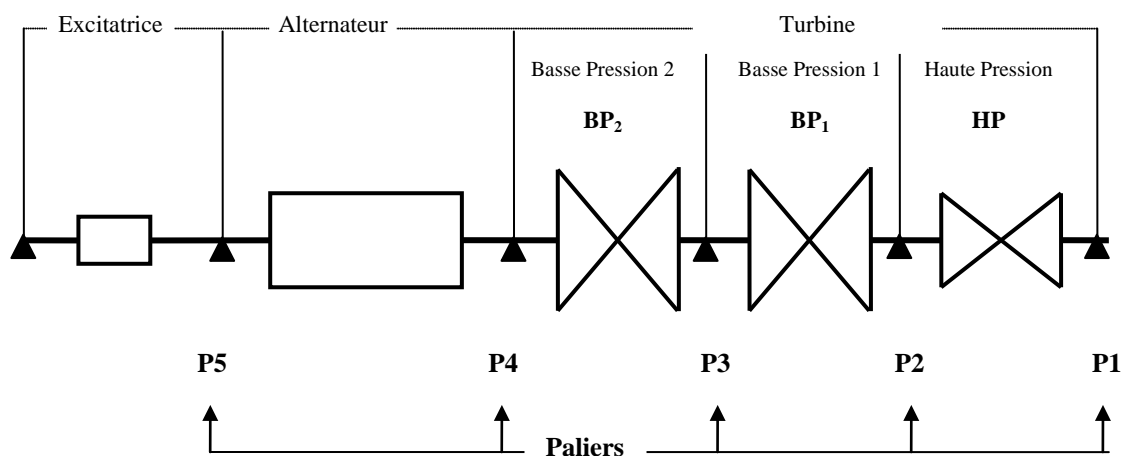


Figure 4.26 : Les points de mesures d'une structure du turbo-alternateur

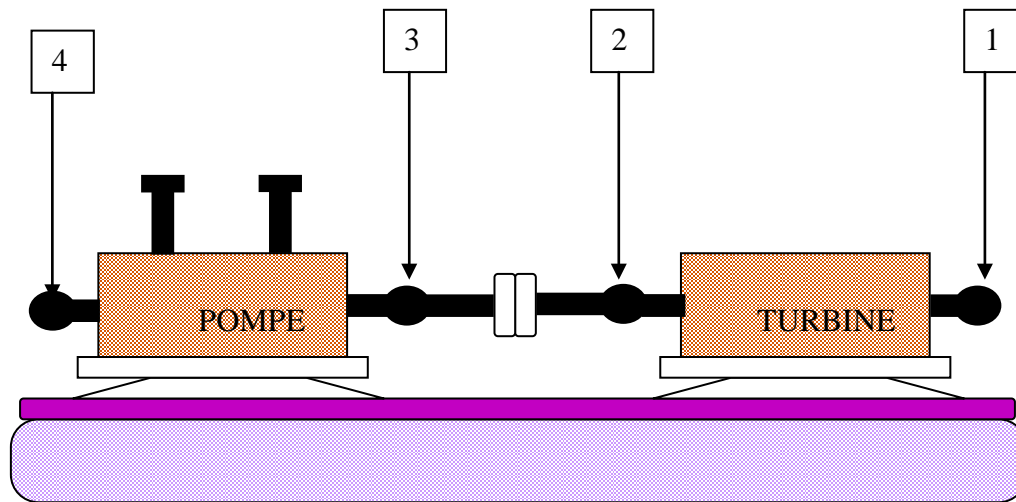


Figure 4-27: Les points de mesures d’une structure de turbo-pompe

4.6.5 Mode de fixation des capteurs

Plusieurs modes de fixation existent : par goujon vissé ou embase collée, par embase magnétique ou par simple pression avec une pointe de touche. Le mode de fixation d’un capteur a une incidence considérable sur la bande passante de ce dernier et surtout sur la reproductibilité de la mesure qui est le fondement même de la surveillance. Il est nécessaire de réaliser une fixation parfaite de l’accéléromètre sur la structure. Des expériences montrent en effet que les anomalies éventuelles proviennent dans 90% des cas d’un accouplement manquant de raideur. Les erreurs introduites affectent surtout la réponse en fréquence de l’accéléromètre et faussent la mesure.

L’accélération de l’embase, seule mesurée par le capteur, n’est plus identique à celle de la structure elle-même, véritable objet de la mesure.

Le graphique de la figure 4.28 permet de guider le choix du mode de fixation le mieux adapté.

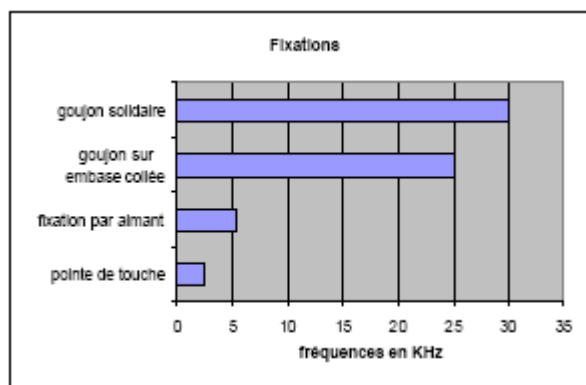


Figure 4.28 : Modes de fixation utilisables selon les plages de fréquences

Les paragraphes précédents ont mis en évidence les deux types de stratégies de surveillance. La figure 4.29 nous permet de mieux comprendre comment vont s'organiser les mesures de vibrations. Un coffret permet la surveillance permanente grâce à la mesure du niveau vibratoire global sur chaque palier. Pour ce qui concerne les relevés périodiques nous utilisons un collecteur de données mobile muni d'un accéléromètre que l'on vient visser sur des pastilles en laiton collées sur les paliers de manière à effectuer les mesures radiales et axiales.

4.7 Mise en oeuvre de la surveillance

4.7.1 Introduction

Le démarrage technique du programme de surveillance par analyse de vibrations comporte plusieurs phases distinctes à savoir :

- Choix des points de mesures, que l'on a détaillé dans la partie précédente,
- Paramétrage des outils et établissement des signatures initiales,
- Constitution du dossier de « surveillance vibratoire »

4.7.2 Stratégie de surveillance permanente

Nous utilisons pour la surveillance vibratoire permanente un coffret de sécurité nommé « VibroControl ». Ce coffret permet la mesure et la surveillance bi-voie de vibration absolue de palier.



Figure 4.29 : photo du module "Vibrocontrol"

Connecté à des accéléromètres fixés sur les paliers, et comme le montre la figure 4.29, ce coffret réalise un traitement numérique par microprocesseur permettant d'indiquer la

valeur efficace ou crête et d'effectuer des intégrations et de l'auto surveillance. Il effectue les calculs nécessaires pour élaborer les indicateurs globaux que nous avons définis au début de ce chapitre.

Il est possible de paramétrer (par clavier ou par logiciel) la gamme de mesure, les seuils, les temporisations, les 3 sorties relais avec des fonctions logiques et on dispose en sortie analogique les résultats de mesures.

4.7.3 Emplacement des capteurs

Le module de surveillance permanente dispose de trois entrées de mesures pour surveiller l'amplitude des vibrations transmises dans les paliers (radiale verticale, radiale horizontale et axiale).(Figure4.30).

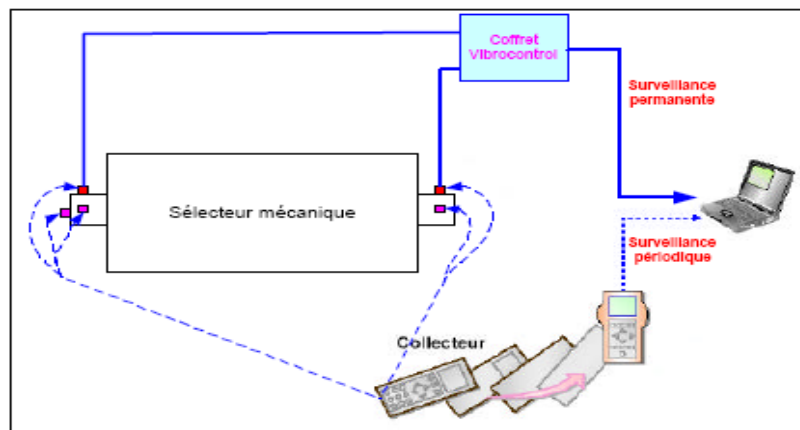


Figure 4.30 : Vue d'ensemble de l'instrumentation nécessaire à la surveillance vibratoire

Les accéléromètres sont placés à 90° l'un par rapport à l'autre au dessus de l'horizontale pour des raisons de commodité. Ces accéléromètres resteront fixés en permanence sur les paliers et des embases sont collées à d'autres endroits pour les relevés périodiques.



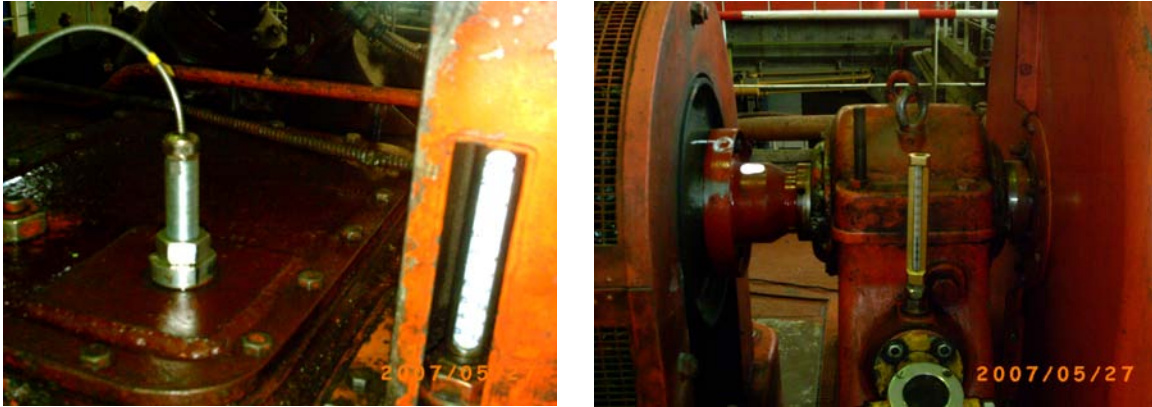


Figure 4.31 (a,b,c,d) : Position des accéléromètres dédiés à la surveillance permanente sur les paliers du sélecteur

4.7.4 Configuration de la surveillance

Lorsque la grandeur mesurée dépasse les seuils, l'incident est signalé et l'événement est reporté dans le journal de bord de l'appareil. On utilisera donc un premier relais pour signaler le dépassement du premier seuil d'alarme (figure 4.32) ; cette signalisation sera matérialisée par un voyant en face avant de la baie. En revanche lorsqu'il y aura dépassement du second seuil, le relais associé à cette alarme devra ouvrir le circuit de sécurité ; la régulation de vitesse devra être coupée pour sécuriser l'installation.

4.8 Stratégie de surveillance périodique (détection précoce)

4.8.1 Introduction

Comme nous l'avons vu au 4.5.5.3, la première valeur capable de révéler l'apparition d'un défaut est la mesure de l'accélération efficace sur une large bande de fréquence. C'est un indicateur révélateur des phénomènes dits « hautes fréquences », mais il ne permet la détection de dégradations qu'à un niveau avancé. On utilisera donc plutôt une surveillance à l'aide des indicateurs spécifiques appelés facteur de crête et facteur de Kurtosis.

La finalité de ce type d'indicateurs appelés « détecteurs de défauts » est de détecter les défauts induisant des forces impulsionnelles ou chocs (jeu de palier dégradation de roulement mais aussi écaillage de denture, d'accouplement, de clavette, frottement rotor/stator...). La présence de forces impulsionnelles a pour effet d'exciter un grand nombre de résonances dans une plage de fréquences que l'on doit adapter à la nature et la durée du choc. Le signal vibratoire qui en résulte est la somme des réponses des résonances excitées et se compose donc de plusieurs familles de trains d'oscillations périodiques dont

les amplitudes décroissent de manière exponentielle. Or la réponse d'une résonance qui concentre la plus grande partie de l'énergie du signal masque totalement la réponse des résonances de fréquences beaucoup plus élevées, comme le montre la figure 4.32.

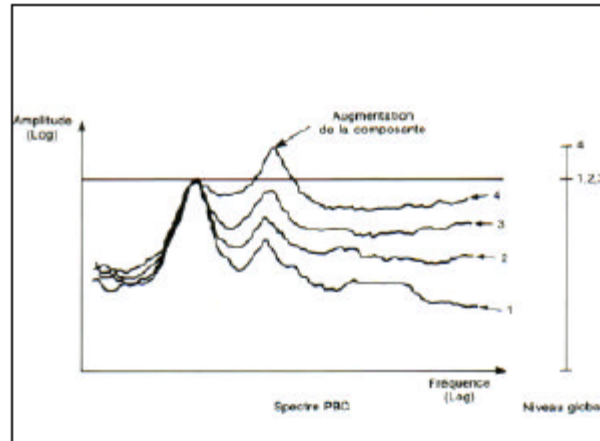


Figure4.32 : Mise en évidence de l'effet de masque du à la grande énergie des résonances basses fréquences

Les courbes 1 à 3 montrent bien une évolution des résonances des fréquences élevées mais le niveau global n'évolue pas car la résonance basse fréquence qui possède la plus grande énergie les masque. C'est uniquement lorsque les niveaux s'élèvent considérablement (courbe 4) que le niveau global évolue. On peut reprendre cet exemple algébriquement. Si A représente la valeur efficace du signal vibratoire du sélecteur mécanique en l'absence de défaut et D la valeur efficace du signal induit par un défaut du palier par exemple, la puissance du signal après apparition de ce défaut devient égale à :

$$A_d^2 = A^2 + D^2 \quad [5.1]$$

et sa valeur efficace devient :

$$A_d = (A^2 + D^2)^{1/2} = A [1 + (D^2 / A^2)]^{1/2} \quad [5.2]$$

Cette dernière relation montre clairement que la valeur efficace de l'amplitude du signal augmentera de manière significative si $D^2 / A^2 > 1$ c'est-à-dire si la puissance du signal vibratoire induit par le défaut est significative devant la puissance du signal induit par le

fonctionnement du sélecteur. Cet effet de masque peut être éliminé en divisant la bande passante en plusieurs bandes et en mesurant dans chacune de ces bandes le facteur de crête ou le Kurtosis du signal et son amplitude efficace. Ainsi le facteur de crête et le Kurtosis « bande étroite » sont plus sensibles que les indicateurs « large bande ». L'exemple suivant montre cette propriété.

Les diagrammes de la figure 4.33 représentent l'évolution relative des indicateurs « valeur efficace » et « Kurtosis » de l'accélération en présence d'un écaillage dans la bande $B=[0-20\text{ kHz}]$ et dans quatre bandes suivantes :

$B1=[0-5\text{ kHz}]$ $B2=[5-10\text{ kHz}]$ $B3=[10-15\text{ kHz}]$ $B4=[15-20\text{ kHz}]$

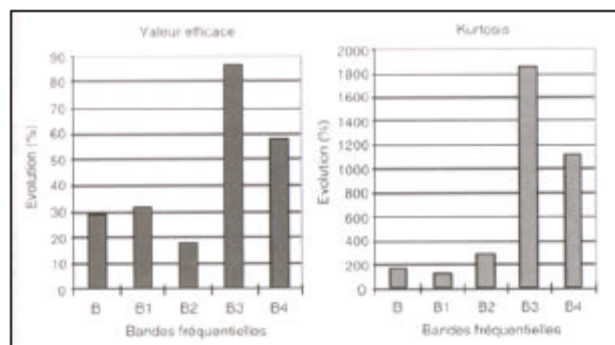


Figure 4.33 : Evolutions relatives de la valeur efficace et du Kurtosis

L'apparition d'écaillages (fréquence de rotation : 12,3 Hz) se traduit par une augmentation relative de la valeur efficace de l'accélération dans la bande B de 29% alors que celle du Kurtosis est de 165%. Le Kurtosis est un indicateur beaucoup plus sensible que la valeur efficace pour détecter l'apparition de défauts induisant des forces impulsionnelles périodiques. Ces diagrammes montrent que ces augmentations relatives sont respectivement égales à 87% et 1836% dans la bande B3. L'analyse « bande étroite » est beaucoup plus sensible que l'analyse « large bande ».

4.8.2 Paramétrage de l'indicateur scalaire : « kurtosis »

On relèvera donc la valeur du facteur de Kurtosis dans les bandes suivantes :

$B1=[0-5\text{ kHz}]$, $B2=[5-10\text{ kHz}]$, $B3=[10-15\text{ kHz}]$, $B4=[15-20\text{ kHz}]$, et sur chaque palier du sélecteur mécanique soit 16 valeurs pour les deux directions radiales et 4 valeurs pour la direction axiale.

L'évolution dans le temps d'un indicateur scalaire se représente par un diagramme appelé « histogramme d'évolution » ou « courbe de tendance ». Le logiciel utilisé nous permet de

voir l'évolution de l'indicateur sur une courbe de tendance et stocke ce graphe en mémoire jusqu'au prochain relevé.

4.8.3 Paramétrage d'un indicateur spectral (spectre PBC)(Pourcentage de bande constante)

Compte tenu du matériel de relevé dont on dispose, il est intéressant d'exploiter ses capacités d'enregistrement. En effet, il est possible de fiabiliser cette surveillance en détectant les défauts des paliers de façon beaucoup plus précoce grâce à des indicateurs sensibles non seulement à l'augmentation de la puissance du signal, mais également aux évolutions de sa forme ou des amplitudes de différentes composantes. Ces indicateurs, sont configurés sur un ordinateur à partir d'un spectre initial. On relève un spectre PBC de 6% par exemple (Figure 4.34) et le logiciel nous permet de paramétrer deux seuils d'alarmes : un seuil d'alerte et un seuil de danger à partir des niveaux initiaux. Pour paramétrer les alarmes, nous fixons le premier seuil, avec un décalage par rapport au spectre de référence de 6 dB et le seuil d'alerte à 20 dB. Ces rapports correspondent respectivement à une augmentation d'amplitude 2 fois supérieure, et 10 fois supérieure à l'amplitude de référence.

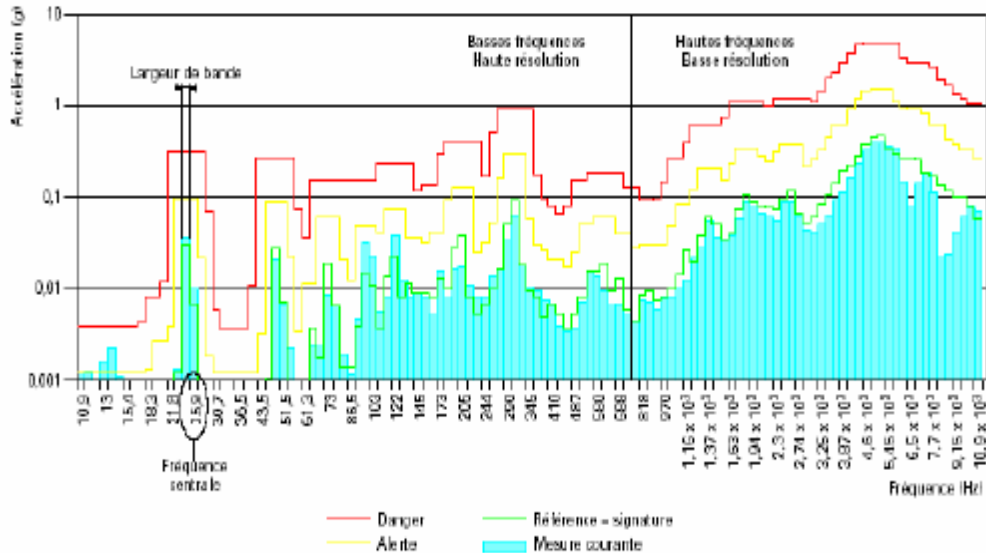


Figure 4.34 : Exemple du spectre PBC d'un turboalternateur

Lorsque nous détecterons des défauts grâce à cette surveillance par suivi d'évolution de spectres, nous utiliserons les indicateurs spectraux complémentaires de façon à accroître la fiabilité du diagnostic.

4.9 Diagnostic

Pour effectuer le diagnostic nous disposons du collecteur de données qui nous permet aussi une analyse directe. Le grand avantage de ce genre d'appareil est qu'il est entièrement paramétrable par logiciel sous Windows ; nous allons pouvoir définir les relevés à effectuer sur chaque machine, et donc créer ce que l'on appellera « route de surveillance » ou « itinéraire ». Une fois l'«itinéraire» effectué sur le site, le collecteur possédera tous les signaux temporels des différents points de mesures. Il faudra ensuite transférer ses données via une liaison série sur un ordinateur et l'on pourra effectuer à l'aide du logiciel, une analyse des données sous différentes formes : mesures globales, spectres (FFT), pourcentage de bande constant (PBC), en fait tous les outils nécessaires à une analyse vibratoire comme nous l'avons détaillée au paragraphe précédent.

4.10 Mise en œuvre

Nous venons d'énumérer les types de mesures que nous effectuerons pour les différentes stratégies de surveillance. Le logiciel de contrôle de tous ces indicateurs nous permet d'établir un « itinéraire de surveillance ». Nous allons en fait indiquer l'ordre chronologique des mesures à effectuer, ainsi que le type de mesures pour chaque point de mesure ; par exemple sur point de mesure nommé « Est Vertical», on devra effectuer 4 mesures de Kurtosis dans les quatre bandes de fréquence définies précédemment et un spectre PBC, en précisant pour chaque mesure : le type de capteur, le type de filtre à utiliser, la valeur à mesurer...

On télécharge ensuite cet itinéraire dans le collecteur de données. Le collecteur suit rigoureusement cet itinéraire en nous indiquant, par exemple, le point de mesure où nous devons installer l'accéléromètre. Une fois le capteur en place, le collecteur de données effectue toutes les mesures paramétrées pour ce point. Lorsque tout l'itinéraire est effectué nous transférons les données sur l'ordinateur, et nous pouvons ainsi constater les éventuels dépassements de seuil ou l'évolution dans le temps des indicateurs globaux et spectraux.

La figure 4.35 illustre, par exemple, l'itinéraire de relevés périodiques.

Celui-ci détaille l'emplacement des points de mesures : sur le guide n°3, plus précisément sur la manip G32 et sur le palier « Est Vertical ». On voit que sur ce point nous avons configuré l'acquisition d'un spectre à pourcentage de bande constante de 6% puis 4 mesures de niveaux globaux selon des bandes passantes.

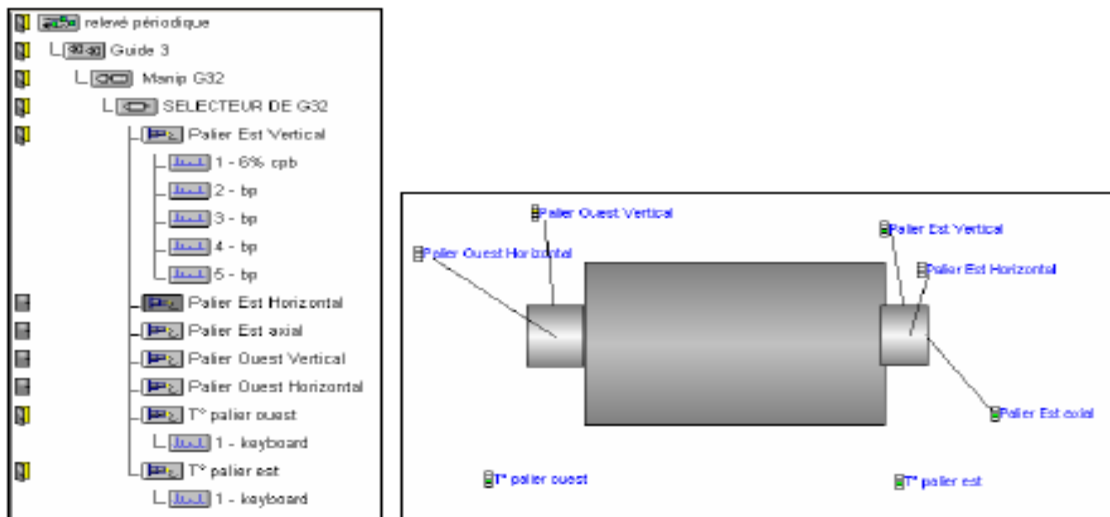


Figure 4.35 : Exemple d'itinéraire pour les relevés périodiques (sur la gauche) et la représentation schématique de l'emplacement des points de mesure (à droite)

4.10.1 Itinéraire appliqué

Lorsque l'on dispose d'appareils pour la collection de données, il sera désirable de construire des routes de mesures pour accélérer la prise de données et la vérification des niveaux vibratoires de façon périodique (figure 4.35 à gauche). Dans la plupart des cas, une seule définition de la route d'inspection sera nécessaire pour permettre le chargement de plusieurs types d'appareils différents, car le logiciel tiendra compte des possibilités de chaque appareil avant d'en effectuer le chargement.

4.11 Application de surveillance par analyse fréquentiel dans le cas des turbo pompes :

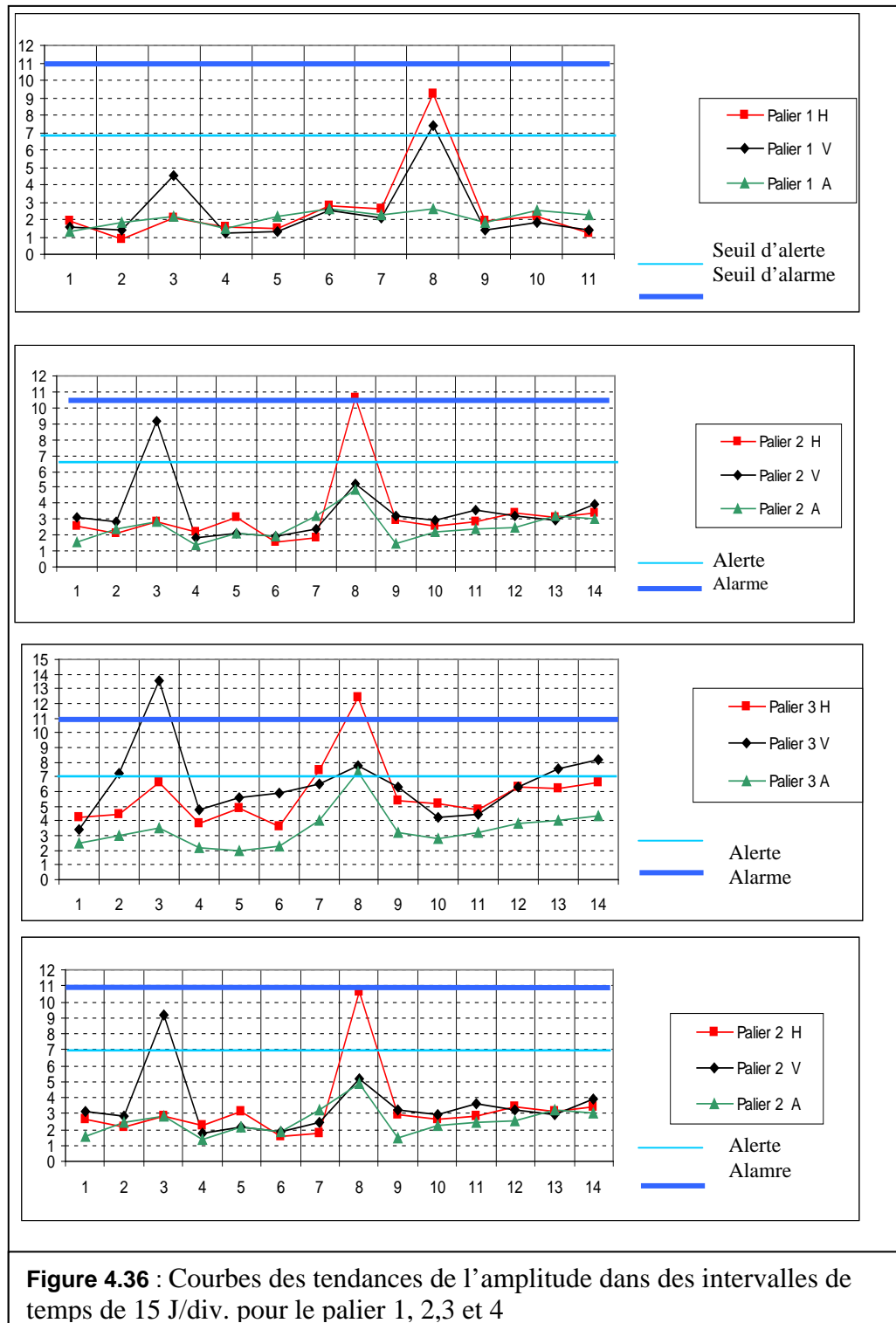


Figure 4.36 : Courbes des tendances de l'amplitude dans des intervalles de temps de 15 J/div. pour le palier 1, 2,3 et 4

4.11.1 Interprétation des courbes d'évolutions :

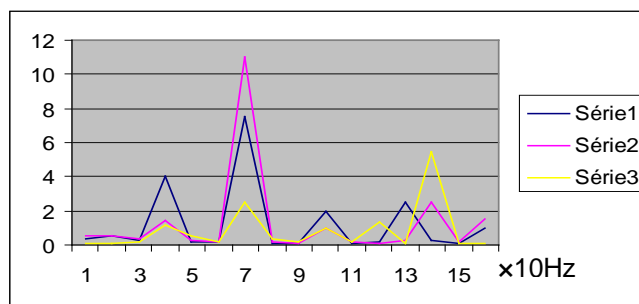
- Les figures A,B,C et D représentent l'évolution de l'indicateur V_{eff} mesurer sur les paliers 1,2,3 et 4 de la turbopompe selon les trois directions H,V,et A pendant une période de 7 mois à raison d'une mesure chaque 2 semaines,

- La brutale augmentation de V_{eff} selon la direction radiale verticale qui atteint 13.6mm/s a montré qu'il s'agissait d'une usure au niveau du palier 03 qui a provoqué à son tour des vibrations excessives au niveau du palier 02. Ces vibrations ont affectées les paliers 04.

La norme internationale ISO 2372 ou 3945 représentée dans le tableau 4.6 nous donne les standards des critères vibratoires qui sont basés sur le fait que des machines similaires et de même taille doivent avoir le même énergie vibratoire donc le même niveau de vitesse efficace entre 10 et 1000Hz.

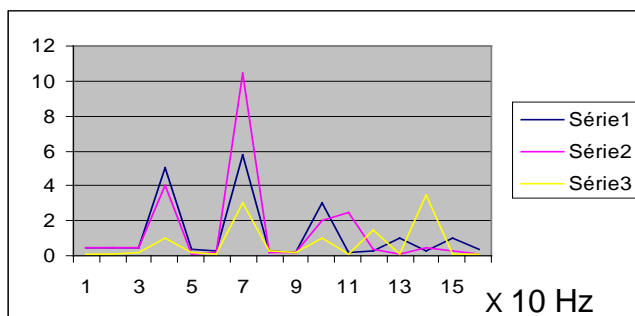
Une surveillance basée sur tels critères détectera de façon indifférenciée le balourd, désalignement et certains défauts électriques à un stade avancé.

Figure4.37a: Spectre en fréquence palier 01



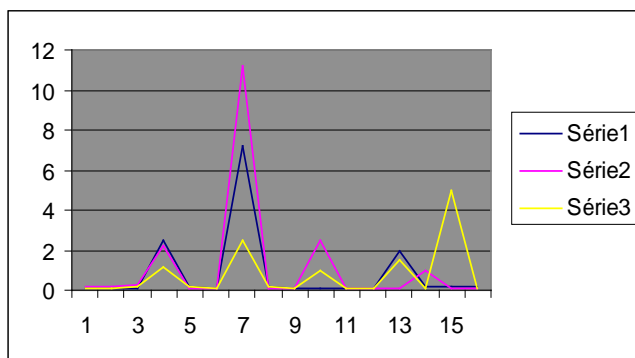
Cette figure illustre de façon simple la nécessité d'effectuer les mesures selon 2 directions radiales orthogonales ; une seule mesure effectuée en direction radiale verticale ($V_{eff}=0-300\text{Hz} = 7.5\text{mm/s}$) n'aurait pas permis l'identification du défaut de balourd.

Figure4.37b: Spectre en fréquence palier 02



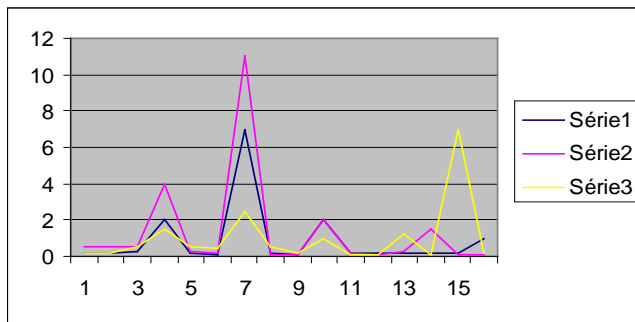
Selon cette figure on remarque l'apparition d'un balourd révélé par la prépondérance de la composante d'ordre 1 qui atteint 10.5mm/s, jugée inadmissible ; on peut voir aussi l'apparition d'un désalignement angulaire révélé par l'augmentation de l'amplitude de la composante d'ordre 2 qui atteint la valeur d'ordre 2 qui atteint la valeur 5.8mm/s, jugée inadmissible.

Figure 4.37c : Spectre en fréquence palier 03



Sur cette figure on observe de façon simple la prépondérance de la composante d'ordre 01 qui atteint les 11.2mm/s, ce qui signifie un défaut de balourd sur la rotor de la pompe ; on peut voir aussi l'apparition d'un défaut d'alignement au niveau de l'accouplement, ce défaut d'ordre 02 atteint la valeur 7.2mm/s.

Figure 4.37d : Spectre en fréquence palier 04



Cette figure montre l'apparition d'un balourd sur le rotor de la pompe d'ordre 01 qui atteint la valeur 10.5mm/s une valeur suffisamment élevée pour mettre en évidence le défaut.

4.11.2 Conclusion :

La surveillance par analyse en fréquence est le mode le plus élaboré et le plus fiable que l'on puisse actuellement imaginer et mettre en œuvre pour assurer la surveillance d'une machine tournante ; ce mode de surveillance présente deux avantages déterminants qui devraient lui permettre de s'imposer comme standard de surveillance :

- Il permet la détection à un stade de la quasi-totalité des défauts susceptibles d'affecter le comportement vibratoire d'une ligne d'arbre et de ses paliers.
- Il fournit des informations suffisamment précises pour permettre d'identifier, de localiser un défaut ou de définir facilement le traitement complémentaire nécessaire à son identification.

4.11.3 Le système d'acquisition

L'entreprise dispose d'un groupe électronique et d'un groupe informatique qui ont développé des racks adaptés pour l'acquisition des données nécessaires sur les spectromètres.



Figure 4.38 : Le rack du groupe électronique

Comme le montre cette figure le système complet se présente sous la forme d'un châssis mixte, qui intègre les alimentations de puissance, les modules CPU et les cartes (conversion analogique-numérique et inverse, contrôle de mouvement...). Le rôle du logiciel embarqué sur la carte CPU est d'assurer la gestion du système, d'organiser les données d'acquisition et de

communiquer avec le programme de pilotage. L'interconnexion entre les différents modules et un ordinateur servant à séquencer les mesures.

4.11.4 Signatures initiales

L'établissement et l'analyse des signatures initiales constituent la base sur laquelle repose la fiabilité de la surveillance et des diagnostics ultérieurs. Une erreur à ce stade peut se traduire par des pertes d'informations préjudiciables à la formulation d'un diagnostic fiable. Il est donc important de réaliser ces signatures initiales en trois phases distinctes : la prise de mesure, le diagnostic, l'optimisation des indicateurs de surveillance et des seuils ou gabarits d'alarmes.

Ces différentes tâches permettront :

- De formuler un diagnostic sur l'état de chaque machine et de procéder aux interventions complémentaires si nécessaire,
- De valider l'intérêt et la définition de chaque indicateur (plage de fréquence, durée de mesures...) et de définir les gabarits ou seuils d'alarme en fonction de l'état réel de chaque machine
- De comparer les signatures et ainsi gagner du temps au moment du diagnostic en comparant les évolutions des signatures vibratoires.

Nous avons effectué un premier itinéraire de relevés définissant ainsi les mesures de références pour permettre des comparaisons avec les futures mesures. A l'aide de ces signatures initiales, nous définissons les seuils d'alarme à +6 dB et +20 dB pour ce qui concerne les spectres PBC. La figure 4.38 représente le spectre PBC 6% relevé sur le palier « Ouest » dans l'axe vertical. Ce premier spectre peut déjà nous apporter quelques renseignements utiles sur l'état de santé du sélecteur.

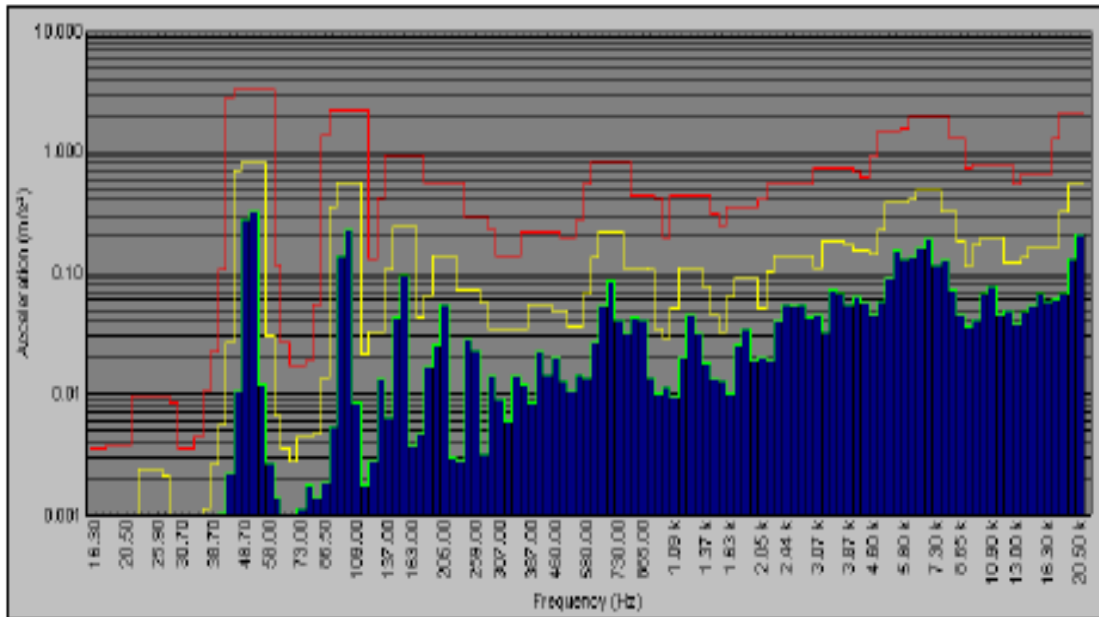


Figure 4.39 : Signature vibratoire initiale relevée sur le palier "N° 1" dans l'axe vertical avec une vitesse de rotation de 3000 tr/min

Au chapitre 4, nous avons rappelé dans le Tableau 4.8, les fréquences caractéristiques consécutives à un défaut. La première amplitude émergente à environ 50 Hz correspond à la fréquence de rotation $f_r = 3000/60 = 50$ Hz et caractérise le défaut de balourd que nous avons mis en évidence. Les futurs relevés seront comparés à cette référence et permettront de constater une évolution d'un défaut. Compte tenu des défauts les plus probables sur notre sélecteur, des défauts des paliers, nous constaterons une évolution du niveau vibratoire dans une bande de fréquence située dans la partie droite du spectre. On devine déjà cette croissance centrée autour de 6 kHz. Cette fréquence doit correspondre à une fréquence de résonance. En regardant la figure 4.40, le spectre relevé sur le palier opposé, nous retrouvons la fréquence caractéristique prépondérante en basse fréquence autour de 50 Hz, et l'on distingue bien l'élévation des amplitudes autour de 6 kHz. Les fréquences caractéristiques situées entre 50 Hz et 300 Hz représentent des multiples de la fréquence de rotation et peuvent matérialiser un désalignement, provoqué à chaque rotation par le balourd important.

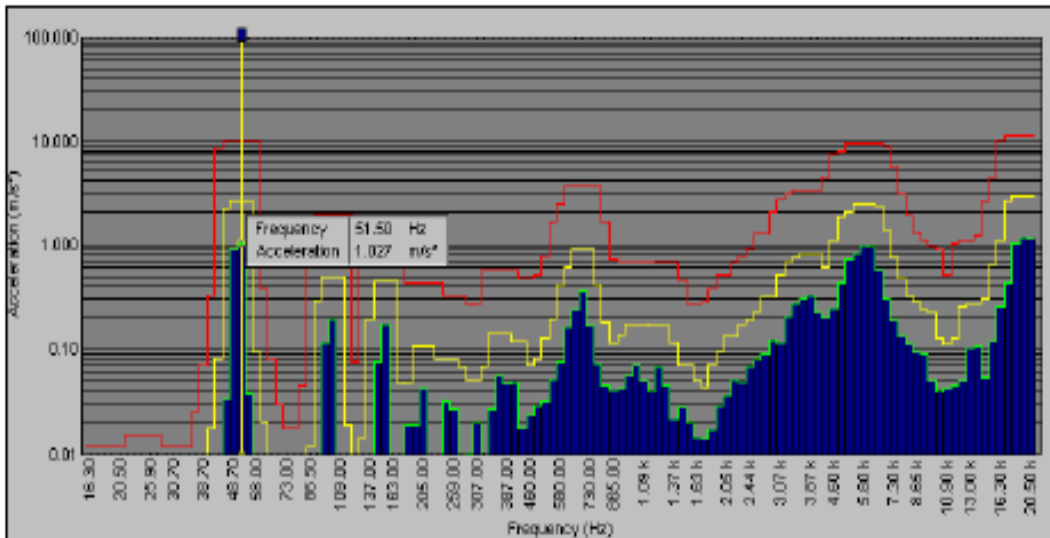


Figure 4.40 : Spectre PBC 6% sur le palier N°1 dans l'axe vertical à une vitesse de rotation de 3000 tr/min.

La première fréquence caractéristique se situe à la fréquence de rotation soit 50Hz.

Nous avons aussi relevé les niveaux globaux tels que le facteur de crête, le Kurtosis, la valeur efficace dans 4 bandes de fréquences. L'archivage de ces valeurs avec les futurs relevés permettra d'établir une courbe de tendance pour connaître l'évolution de ces indicateurs.

4.11.5 Constitution du dossier «Surveillance»

Un classeur de suivi des relevés et des interventions est nécessaire au bon déroulement de la surveillance et du diagnostic. Ce classeur possédera plusieurs onglets permettant ainsi le classement des relevés et analyses des différentes machines. Les paragraphes suivants illustrent leurs contenus :

4.11.6 Définition de la surveillance

Pour chaque machine surveillée, on pourra trouver dans cette partie :

- des fiches « Définition machine » ;

Tableau 4.12 : Fiche définition machine

Entreprise	<i>Surveillance Vibratoire</i>				
	DEFINITION MACHINE				
Désignation					
Localisation					
N° repère					
Nbre de tours					
Direction	PALIERS				
	1	2	3	4	5
Horizontale					
Verticale					
Axiale					

- les listings sur les défauts ;
- tout renseignement cinématique complémentaire fourni par des plans ou le constructeur ;
- une fiche « Fréquences de défauts » qui synthétise toutes ces

4.11.7 Rapport technique d'analyse

- niveaux globaux ;
- spectres PBC 6, 23 ou 70 % ;
- spectres RC (basses et hautes fréquences)
- spectres « enveloppes »
- Une fiche « Suivi des interventions » qui récapitule les dates et les particularités de tous les relevés effectués sur la machine.

Tableau 4.13 : Exemple de fiche de suivi des interventions

Entreprise	Surveillance vibratoire
	Suivi des interventions
Désignation	
Localisation	
N° repère	
Date	Observations
05/03/2007	Mesure juste avant révision
06/06/2007	Changement pompe
04/07/2007	Vérification paliers
01/08/2007	Début de la révision
30/08/2007	Fin de la révision

4.11.8 Interventions réalisées suite aux diagnostics

Le but de cette partie est de conserver la mémoire de toutes les interventions réalisées sur les machines à la suite d'un diagnostic vibratoire ayant révélé un défaut. Cela constitue une base de données précieuse pour :

- faire évoluer l'analyse sur l'installation surveillée ;
- accroître la connaissance de la machine surveillée en particulier ;
- développer son expérience en analyse vibratoire en général.

Tout cela peut avantageusement être complété par un dossier informatique.

4.11.9 contrôle informatique

Le pilotage du sélecteur mécanique doit pouvoir être effectué par informatique de façon à pouvoir automatiser les changements de longueur d'onde en fonction des expériences. Une interface graphique permettra une visualisation de la vitesse actuelle (donc la longueur d'onde actuellement sélectionnée) et la modification de celle ci ; il est aussi utile d'y faire figurer l'état de toutes les sécurités pour informer l'utilisateur de l'état de fonctionnement du sélecteur et grâce au module « Vibrocontrol » nous pouvons connaître une valeur représentative du niveau vibratoire et ainsi afficher une courbe de tendance représentant l'évolution de cette valeur dans le temps.



Figure4.41 : Vue générale du poste de contrôle

Figure 4.42 : Exemple d'analyse de tendance

Les analyses de tendances peuvent être générées à partir du niveau global (efficace, crête ou facteur crête et Kurtosis), ou à partir du contenu d'une bande de fréquence. Les notes d'inspection ou historique des interventions peuvent aussi apparaître sur la courbe de tendance. L'analyseur de vibration peut ensuite effectuer une extrapolation des données à l'aide de divers modèles afin de prédire la date ou certains seuils d'amplitude seront atteints. Des niveaux d'alerte et d'alarme peuvent être définis individuellement pour chaque point de mesure et plusieurs types de rapports peuvent être générés, afin de permettre d'avoir une vue d'ensemble sur la condition générale des machines.

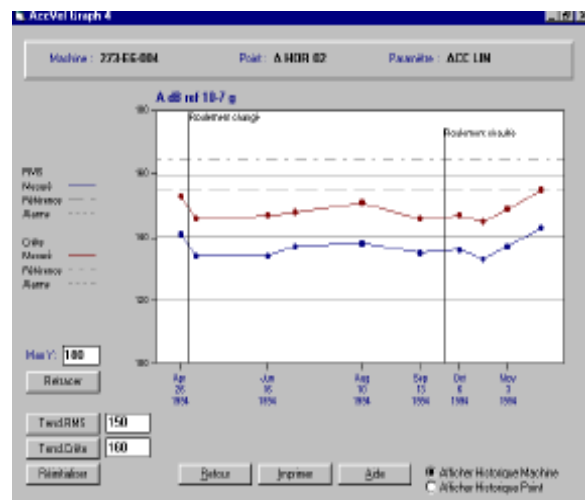
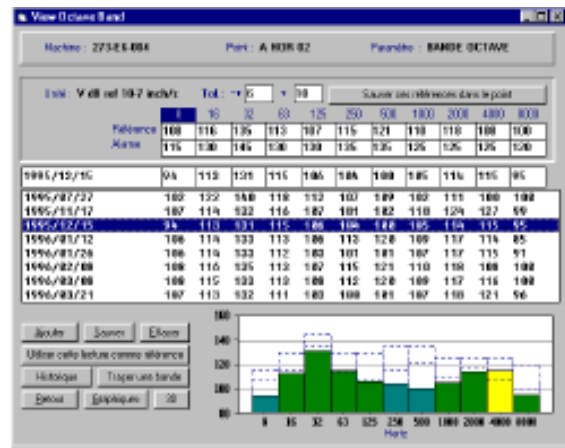


Figure 4.43 : Exemple de détection des défauts en utilisant la comparaison de spectre PBC

Une des méthodes offrant beaucoup d'avantages pour la détection des fautes et le suivi des niveaux de vibration sur les machines tournantes est basée sur l'utilisation de la comparaison de spectres à pourcentage de bande constant (bandes d'octave et fractions d'octave).. Ceci sera particulièrement utile pour la surveillance des machines tournantes où le nombre d'équipement est élevé car il sera ainsi possible d'optimiser le temps passé entre les opérations de détection et de diagnostic. La méthode est aussi peu sensible aux variations de vitesse.



4.12 Conclusion

Ce chapitre rappelle les principes de base de l'analyse vibratoire et les notions de base de dynamique appliquée à la maintenance prédictive. Leurs applications à des systèmes réels sont brièvement exposées. Dans ce chapitre, une mise en place de la surveillance en ligne a été effectuée. Une méthodologie de calcul des réponses vibratoire appliquée au modèle nous a permis de déterminer une zone de mesure vibratoire optimale de détection des défauts sur les paliers des turboalternateurs. Cette procédure est validée expérimentalement en comparant les accélérations maximales en différents points de mesure au point optimal de détection. On montre alors que les points optimaux de détection peuvent également être utilisés pour réaliser ce suivi. Le point de mesure à privilégier reste celui qui se situe au plus près de la source. Cependant, sur la plupart des machines, ces zones de mesures ne sont pas systématiquement accessibles. Il convient donc de rechercher des points de mesure situés en d'autres lieux (par exemple le carter) permettant de détecter et de suivre au mieux les défauts au niveau des coussinets d'un palier.

Nous pouvons dire aussi que l'outil informatique permet d'améliorer la précision des diagnostics obtenus, il est aussi un élément primordial pour la gestion des opérations de maintenance prédictive, ce qui résultera en une augmentation significative de la productivité et la réduction des coûts d'intervention.

CHAPITRE 5

Diagnostic des systèmes**5.1 Généralités**

Le choix d'une stratégie de diagnostic dépend du cahier des charges que l'on s'est fixé ainsi que de l'application considérée. Par exemple, le type d'information accessible sur le système ou le type de défauts à détecter conditionnant la mise en oeuvre d'une stratégie spécifique. Ainsi, si les seules données entrée / sortie sont disponibles sur le système, une méthode par apprentissage semblera adaptée. Si au contraire un modèle mathématique peut-être développé, les méthodes analytiques seront privilégiées. Mais avant de développer les différentes méthodes de diagnostic connues dans la littérature, nous aborderons donc la conception de la stratégie de diagnostic selon les trois principes de base suivants :

- **définition des objectifs** : que veut-on surveiller ?

Quels types de défauts doit-on détecter ?

- **définition des critères** : quelles sont les performances attendues ?

Quels sont les critères pour juger de telles opérations ?

- **définition des systèmes de surveillance** : qu'est-ce que la redondance d'informations?

Quel est le principe d'un système de diagnostic ?

Bien d'autres critères doivent être pris en considération avant de développer un système de surveillance, tels que :

- la rapidité des réponses,
- la sensibilité aux variations des mesures,
- La robustesse des algorithmes aux erreurs de modélisation,
- le taux de fausses alarmes ou de non détection...

Mais aussi les contraintes d'ordre économique, ergonomique et mécanique et le temps de développement.

5.2 Définitions et concepts généraux

La difficulté majeure rencontrée lors de la description des concepts et de la terminologie utilisée dans le monde des systèmes industriels provient du fait que l'on peut aborder le diagnostic de différentes manières selon l'origine et la formation des intervenants. De plus, les différences sont très subtiles et subjectives [ZWIN95].

- **Fonctionnement normal d'un système.** Un système est dit dans un état de fonctionnement normal lorsque les variables le caractérisant (variables d'état, variables de sortie, variables d'entrée, paramètres du système) demeurent au voisinage de leurs valeurs nominales. Le système est dit défaillant dans le cas contraire.
- Une **défaillance** est la cause d'une anomalie.
- Une **dégradation** d'un procédé caractérise le processus qui amène à un état défaillant du procédé.
- Un **défaut** se définit comme une anomalie du comportement d'un système sans forcément remettre en cause sa fonction.
- Une **panne** caractérise l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Un système est toutefois généralement considéré en panne dès l'apparition d'une défaillance.
- Un **symptôme** est l'événement ou l'ensemble de données au travers duquel le système de détection identifie le passage du procédé dans un fonctionnement anormal. C'est le seul élément dont a connaissance le système de surveillance au moment de la détection d'une anomalie.

La distinction entre ces définitions est établie en considérant les aspects comportementaux et fonctionnels [PLOI98]. Ainsi, un défaut (comportement) n'entraîne pas forcément une défaillance (fonctionnelle), c'est-à-dire une impossibilité pour le procédé d'accomplir sa tâche. Le défaut n'induit pas nécessairement une défaillance mais il en est la cause, et c'est donc bien la caractérisation de ces défauts qui nous intéresse ici afin de prévenir toute défaillance. Ainsi, une panne résulte toujours d'une ou de plusieurs défaillances qui elles-mêmes résultent d'un ou de plusieurs défauts. Enfin, on utilise aussi le terme plus générique d'anomalie pour évoquer une particularité non-conforme à une référence comportementale ou fonctionnelle. Les défauts, défaillances et pannes sont des anomalies. On conçoit aisément les progrès apportés à l'industrie par des méthodes automatiques de surveillance, de diagnostic et de supervision. Il est clair aussi que pour s'attaquer à ce

problème, il faut des connaissances approfondies sur l'installation : connaissances de son comportement normal, mais aussi de son comportement anormal.

Souvent, un défaut est modélisé avec les mêmes outils que ceux utilisés pour présenter le procédé en état normal. Il est bien clair aussi que si l'on a une bonne connaissance des anomalies possibles, il faut l'utiliser pour améliorer la surveillance et le diagnostic. Les outils classiques de supervision doivent être complétés par des outils de surveillance, de diagnostic et d'aide à la décision qui s'intègrent à la supervision [TRAV97](figure 5.1). La **supervision** consiste à gérer et à surveiller l'exécution d'une opération ou d'un travail accompli par l'homme ou une machine, puis à proposer des actions correctives si besoin est. La **surveillance** est une opération de recueil en continu des signaux et commandes d'un procédé afin de reconstituer l'état de fonctionnement réel. Ainsi, la surveillance utilise les données provenant du système pour représenter l'état de fonctionnement puis en détecter les évolutions. Le **diagnostic** identifie la cause de ces évolutions, puis le module d'aide à la décision propose des actions correctives.

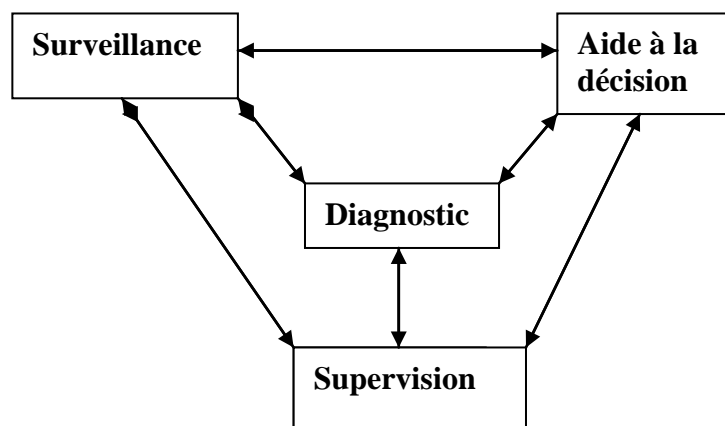


Figure 5. 1 : Introduction d'outils de surveillance, de diagnostic et d'aide à la décision au niveau de la supervision

L'impératif de sûreté de fonctionnement, lié aux enjeux économiques en cas d'incidents ou de pannes, impose une maîtrise importante de ces techniques de surveillance et de diagnostic. En effet, en raison de la complexité des systèmes industriels, du principe de disponibilité maximale et de compétitivité des entreprises, la surveillance, le diagnostic et l'aide à la décision sont devenus des techniques très importantes et s'insèrent dans toute la chaîne de production d'un produit, de la conception à la maintenance.

5.3 Objectifs du diagnostic

La détection de défauts appliquée aux générateurs électriques vise à assurer un asservissement acceptable en tout temps par rapport à quatre objectifs qui sont :

- Éviter les instabilités et les arrêts non planifiés
- Augmenter la disponibilité des générateurs
- Éviter les détériorations de l'équipement
- Assurer la qualité de l'alimentation électrique

Les arrêts non planifiés peuvent être le résultat d'instabilités dues à un mauvais asservissement.

Lorsque le générateur devient instable, il perd le synchronisme par rapport au reste du réseau, cesse de fournir de la puissance et des mécanismes de protection l'arrêtent pour éviter les dommages qui pourraient résulter des survitesses. Si plusieurs générateurs deviennent instables en même temps, le réseau devient instable localement. Il peut alors se produire une séparation d'une partie du réseau et une interruption d'alimentation dans cette zone instable. Des pénalités financières sont généralement prévues pour toute interruption d'alimentation chez un client industriel.

L'augmentation de la disponibilité des équipements est particulièrement avantageuse pour le producteur privé qui vend sa production sur le marché de l'électricité. Dans certaines périodes, le prix de vente de l'électricité atteint plusieurs fois le prix normal. C'est dans ces moments qu'il faut bénéficier d'installations disponibles pour la production. De même, lors de la période de crue, si les équipements ne sont pas disponibles, il se peut que la capacité maximale de stockage d'eau soit atteinte et qu'il faille laisser passer l'eau sans produire d'électricité ce qui correspond à une perte de production.

La mauvaise qualité d'asservissement entraîne sur la majorité des systèmes une détérioration prématurée des équipements. Un mauvais asservissement cause des régimes transitoires allongés et des oscillations en régime permanent. L'utilisation abusive du système de régulation, notamment de la valve pilote et du servomécanisme de positionnement des directrices, en augmente l'usure. Pour le régulateur mécanique, toute pièce mobile soumise à une variation permanente plutôt que temporaire aura de même tendance à s'user prématurément. Il est hors de la portée de ce travail de prouver qu'un mauvais asservissement cause un vieillissement accéléré de la machine elle-même.

La qualité d'alimentation électrique est la constance de l'onde de tension aux bornes de l'alternateur. Si la machine subit une oscillation de couple en régime permanent, alors la puissance injectée sur le réseau présentera une oscillation sous synchrone. Puisque la

puissance consommée sur un grand réseau est approximativement constante sur une courte période de temps, il y aura donc une compensation de l'oscillation de puissance effectuée par d'autres générateurs sur le réseau. Cette compensation crée un mode d'oscillation indésirable. Dans un contexte de déréglementation du marché de l'électricité, les producteurs doivent être responsables par rapport à la qualité de l'alimentation car la qualité de l'électricité chez le client est conditionnée par l'ensemble des générateurs présents sur le réseau.

5.4 Méthodes de diagnostic

Les nouvelles technologies ont grandement augmenté la complexité des systèmes conçus par l'homme. De nos jours des systèmes technologiques complexes sont embarqués, c'est-à-dire qu'ils contiennent des éléments matériels et logiciels fortement couplés. Le maintien de la sécurité, et d'un fonctionnement ininterrompu de ces systèmes est devenu un enjeu important. Le but du diagnostic est d'identifier les premières causes (fautes) d'un ensemble de symptômes observés (déviations par rapport à un fonctionnement normal) qui indiquent une dégradation ou une panne de certains composants du système conduisant à un comportement anormal du système.

Une revue de ces différentes méthodes est donnée dans [DASH00]. Un certain nombre de méthodes existent, parmi lesquelles il est parfois difficile de déterminer laquelle faut-il mieux utiliser [BISW04]. Les méthodes de diagnostic diffèrent non seulement par la façon avec laquelle la connaissance sur le processus est utilisée mais aussi sur la nature de la connaissance requise. Une classification des ces méthodes reposant sur la nature de la connaissance requise est donnée sur la figure 5.2. De manière générale, les méthodes sont séparées en deux catégories suivant qu'elles nécessitent explicitement un modèle du procédé ou qu'elles sont basées sur la possession d'historiques de fonctionnement du procédé. La première catégorie repose sur une connaissance en profondeur du système incluant les relations causales entre les différents éléments tandis que la deuxième sur de la connaissance glanée à partir d'expériences passées (on parlera aussi de connaissance superficielle, apparente basée sur l'histoire du processus). Une comparaison détaillée des différentes méthodes peut être trouvée dans [HIMM78]; [MYLA96]; [VENK95]; [KEMP04a]. Nous ne décrivons ci-dessous que les principales caractéristiques de ces deux familles : les méthodes à base de modèles et celles à base d'historiques du procédé.

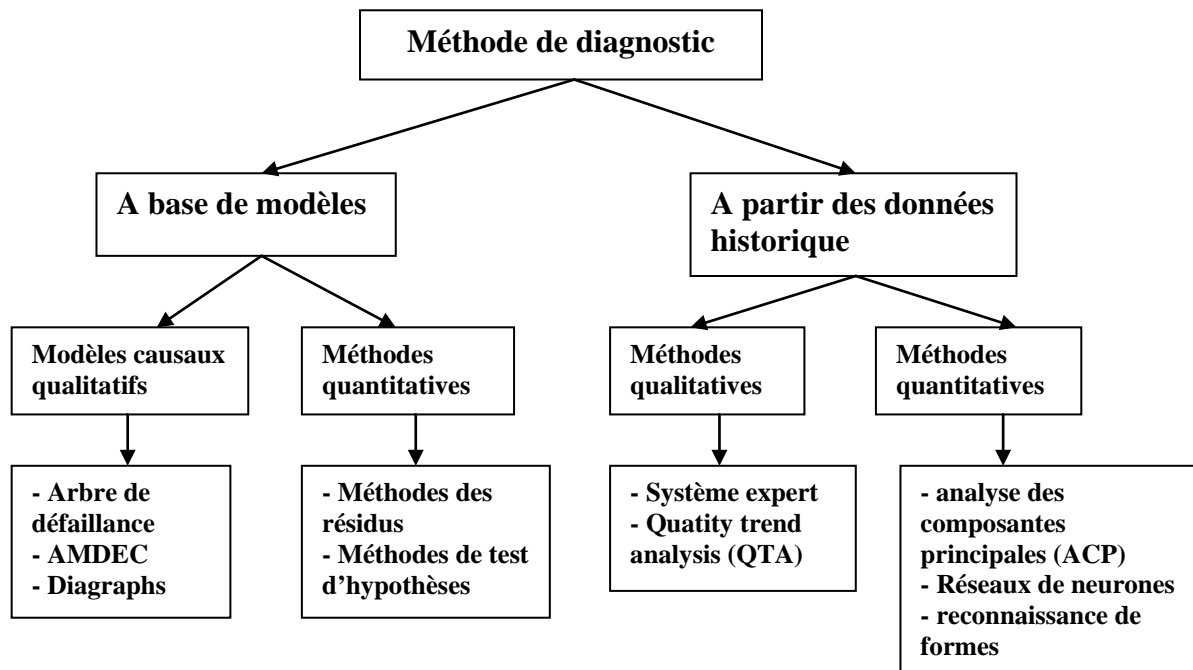


Figure 5.2 : Classification des méthodes de diagnostic [DASH, 00]

5.4.1 Méthodes à base de modèles

La source de la connaissance dans le cas de ces méthodes est la compréhension approfondie du procédé grâce à l'utilisation des principes fondamentaux de la physique.

Ceci se traduit par un ensemble de relations qui décrivent les interactions entre les différentes variables du processus. Ces ensembles de relations peuvent être encore divisés en modèles causaux qualitatifs et en modèles quantitatifs ou méthodes quantitatives.

5.4.1.1 Modèles causaux qualitatifs

La stratégie employée ici est l'établissement de relation de cause à effet pour décrire le fonctionnement du système. Parmi les méthodes les plus populaires, citons les arbres de fautes et les digraphes. Les arbres de faute [LAPP77] utilisent le chaînage arrière ou simulation arrière jusqu'à trouver un événement primaire qui serait une des possibles causes de la déviation de comportement du procédé observée. Les digraphes signés sont une autre représentation d'une information causale [IRI 79] dans laquelle les variables du processus sont représentées par des noeuds de graphes et les relations causales par des arcs. Une limitation importante de ces méthodes réside dans la génération d'un grand nombre d'hypothèses pouvant conduire à une résolution erronée du problème ou à une solution très incertaine. Ceci est dû en partie aux ambiguïtés de nature qualitative qui y sont manipulées.

A- Méthodes d'analyse dysfonctionnelle

L'analyse dysfonctionnelle s'appuie sur une méthodologie rigoureuse et des outils puissants qui permettent la modélisation des défaillances fonctionnelles. Ainsi, les méthodes mises au point pour les études des risques et de la sûreté de fonctionnement permettent la résolution des problèmes de diagnostic de défaillances. Le principe de ces méthodes consiste à établir a priori et de manière formelle les liens entre les causes et leurs effets mesurables par les opérateurs ou les systèmes de traitement de l'information.

B – Méthodes déductives (Arbre de défaillance)

Les méthodes déductives de diagnostic correspondent à une approche ascendante où l'on identifie toutes les combinaisons d'événements élémentaires possibles qui entraînent la réalisation d'un événement unique indésirable, dans cette catégorie on trouve la méthode des Arbres de Défaillances ou AdD .

L'AdD [LIMM91] et [Vill88] est une technique d'analyse basée sur un raisonnement déductif ayant pour objectif de représenter graphiquement au moyen d'une structure arborescente et des portes logiques les diverses combinaisons possibles d'événements qui entraînent la réalisation d'un événement unique non souhaité.

C - Méthodes inductives (AMDEC)

Pour les méthodes inductives, la démarche est bien sûr inversée puisque l'on part de l'événement indésirable et l'on recherche ensuite par une approche descendante toutes les causes possibles. A titre d'exemple nous exposons la méthode la plus couramment utilisée l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances de leurs Effets et de leur Criticité) .

L'AMDEC est une méthode d'analyse critique qui consiste à identifier de façon inductive et systématique les risques des dysfonctionnements d'un système puis d'en rechercher les origines et leurs conséquences [MOUS 02] et [Vill88]

Avant d'aborder l'analyse proprement dite, il est indispensable de définir le système et la phase de fonctionnement pour laquelle l'étude sera menée, et d'identifier les fonctions des éléments du système tout en fixant le niveau de décomposition. La mise en oeuvre de l'analyse consiste à analyser les mécanismes de défaillances et ce à travers :

- L'identification des modes de défaillance de tous les éléments du système.
- La recherche des causes possibles de défaillance, pour chaque mode de défaillance identifié.

- La recherche des effets sur le système et sur l'utilisateur, pour chaque combinaison cause-mode de défaillance.
- La recherche des détections possibles, pour chaque combinaison cause-mode de défaillance.

5.4.1.2 Les méthodes quantitatives

Elles reposent sur les relations mathématiques qui existent entre les variables. Un modèle essaie d'exprimer ces relations sous une forme compacte. Les modèles sont développés en utilisant les lois fondamentales de la physique (bilan de masse, d'énergie, de quantité de mouvement, ...) ou des relations de type entrée-sortie. Ils peuvent être dynamiques, statiques, linéaires ou non-linéaires. En général, ces méthodes utilisent la structure générique suivante :

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu + Ed + Ef \quad [5.1]$$

$$y = Cx + Du \quad [5.2]$$

avec :

les états (x), les entrées (u), les sorties (y), les perturbations (d) et les fautes (f). Les méthodes quantitatives les plus connues sont les méthodes dites des résidus et de tests d'hypothèses. Les premières incluent généralement deux grandes étapes :

la génération de résidus et le processus permettant d'identifier la cause. Lorsque u'il y a faute, les équations de redondance ne sont plus vérifiées et un résidu $r \neq 0$ se produit.

De manière simplifiée, r représente la différence entre différentes fonctions des sorties et les valeurs de ces fonctions sous des conditions normales (en absence de faute). La procédure pour générer les résidus peut aller de la redondance matérielle à l'utilisation de méthodes complexes d'estimation des états et des paramètres du modèle. Les méthodes d'estimation d'état nécessitant la reconstruction des sorties (y) du système, grâce par exemple à un filtre de Kalman, couvrent à la fois les approches de type espace-parité et les observateurs. Les méthodes d'estimation de paramètres font l'hypothèse que les fautes survenant dans un système dynamique se manifestent par un changement des paramètres de ce système.

La seconde étape est le processus de décision : les résidus générés sont examinés en tant que signatures de faute. Les fonctions de décision sont des fonctions de ces résidus auxquelles ont été adjointes des règles de décision logiques. Les méthodes dites de tests d'hypothèses attribuent les résidus à une violation de certaines hypothèses liées au comportement normal du système. C'est le principe de "Diagnostic model processor (DMP) » [PETT90].

5.4.2 Méthodes à partir de données historiques

Par rapport aux méthodes à base de modèles où la connaissance a priori (quantitative ou qualitative) sur le processus est requise, dans les méthodes à partir de données historiques, une large quantité de données enregistrées sur le fonctionnement du système (normal et au cours de défaillances) est nécessaire. L'extraction de l'information peut être de nature quantitative ou qualitative. Deux des plus importantes méthodes d'extraction qualitative d'information d'historique sont les systèmes experts [ZWIN95] et les méthodes de modélisation de tendance [VEDA95]. Les méthodes d'extraction d'information quantitative peuvent être amplement classées en non statistiques et statistiques. Les réseaux de neurones représentent une classe importante des classificateurs non statistiques [KAVU94] ; [LEON90]. L'analyse en composantes principales (ACP) et les méthodes de classification ou de reconnaissance de formes constituent une composante majeure des méthodes d'extraction des caractéristiques statistiques [NONG 96].

5.4.2.1 Méthodes qualitatives

Les applications à l'aide de **systèmes experts** réalisées avec le plus de succès ont été celles basées sur des systèmes basés sur de règles pour la sélection structurée ou la perspective de classification heuristique du diagnostic. Un système expert est un système informatique destiné à résoudre un problème précis à partir d'une analyse et d'une représentation des connaissances et du raisonnement d'un (ou plusieurs) spécialiste(s) de ce problème. Ils sont composés de deux parties indépendantes : (a) une base de connaissances (base de règles) qui modélise la connaissance du domaine considéré et d'une base de faits qui contient les informations concernant le cas traité, et (b) un moteur d'inférences capable de raisonner à partir des informations contenues dans la base de connaissances. Au fur et à mesure que les règles sont appliquées des nouveaux faits se déduisent et se rajoutent à la base de faits. Les principaux avantages des systèmes experts pour le diagnostic sont leur capacité à donner des réponses en présence d'incertitude et leur capacité à apporter des

explications aux solutions fournies. Leur difficulté spécifique est la capture de la connaissance (faits et règles) c'est-à-dire la définition et la description du raisonnement associé à partir d'une situation donnée.

A - Systèmes experts ou systèmes à base de connaissance

L'extraction des caractéristiques qualitatives basées sur des règles est largement utilisée dans les systèmes experts. Un système expert est un système spécialisé qui résout les problèmes dans un domaine d'expertise spécifique. Les étapes principales dans le développement d'un système expert sont:

- Acquisition de connaissance.
- Choix de représentation de la connaissance.
- Codage des connaissances sous forme d'une base de connaissance.
- Développement du moteur d'inférence et les interfaces d'entrées/ sorties.

Il existe de nombreux articles qui traitent de l'application des systèmes experts dans le diagnostic des défaillances [LUNZ91], [HOGA91] et [CHIA00].

- Etape d'apprentissage qui consiste à déterminer l'espace de représentation, à définir l'espace de décision (classes) et à mettre au point une règle de discrimination aboutissant à des frontières de décision entre les classes;
- Etape de décision qui consiste à associer un nouveau vecteur à l'une des classes prédéfinies en appliquant la règle de décision élaborée lors de l'étape d'apprentissage. Le diagnostic par reconnaissance des formes consiste à déterminer le degré de similarité entre des formes fournies par des capteurs et des formes obtenues préalablement par apprentissage, ce qui permet de détecter l'apparition d'un défaut et d'apprécier le degré de bon fonctionnement du système.

B - L'analyse de tendance qualitative (QTA)

Utilise l'information de type tendance présente dans les mesures issues des capteurs. Il y a deux étapes de base, l'identification de tendances dans les mesures, et l'interprétation de ces tendances en terme de scénarios de fautes. Le processus d'identification doit être robuste par rapport aux variations momentanées du signal (dues au bruit) et capturer seulement les variations importantes. Le filtrage peut altérer le caractère qualitatif essentiel contenu dans le signal. On peut par exemple utiliser un système à base de fenêtrage pour identifier des tendances à des niveaux divers (c'est-à-dire à des niveaux de détail différents) et cette représentation peut alors être utilisée pour le diagnostic et la commande

supervisée. Ces tendances dans le processus peuvent être transformées en fautes pour ainsi construire la base de connaissance utilisée pour le diagnostic.

5.4.2.2 Méthodes quantitatives

Quand la connaissance sur le procédé à surveiller n'est pas suffisante et que le développement d'un modèle de connaissance du procédé est impossible, l'utilisation de modèles dits « boîte noire » peut être envisagée. C'est le cas de l'utilisation de :

A - composantes principales (ACP) : ont été utilisées avec succès dans le domaine du diagnostic. C'est un outil capable de compresser des données et qui permet de réduire leur dimensionnalité de sorte que l'information essentielle soit conservée et plus facile à analyser que dans l'ensemble original des données. Le but principal de l'ACP est de trouver un ensemble de facteurs (composantes) qui ait une dimension inférieure à celle de l'ensemble original de données et qui puisse décrire correctement les tendances principales. Une limitation importante de la surveillance basée sur l'ACP est que la représentation obtenue est invariante dans le temps, alors qu'elle aurait besoin d'être mise à jour périodiquement.

B - Réseau de neurones : Les principes de fonctionnement des réseaux de neurones sont inspirés du cerveau humain. Le calcul neuromimétique, né du rapprochement de la biologie et de l'informatique, présente des perspectives d'applications particulièrement intéressantes pour l'aide au diagnostic. En effet, cette méthode possède des propriétés similaires à celles de reconnaissance des formes pour la classification automatique de signatures [DUBU90], [BERG95] et [ZWIN 95] .

Un réseau de neurones artificiels est composé d'automates connectés en réseau et fonctionnant en parallèle dans lequel les connexions contiennent la connaissance du domaine particulier. Les décisions sur une connaissance sont prises dans les interconnexions et en relation avec les fonctions de transition.

C - Reconnaissance des formes : Méthodes de diagnostic par analyse des signatures externes s'appliquent dans les situations où la modélisation des mécanismes reliant les causes des défaillances n'est pas techniquement possible. Elles sont basées sur le retour d'expérience. En effet, le diagnostic des défaillances est essentiellement un problème de classification [VENK 03], donc sa traduction sous forme d'un problème classique de reconnaissance de forme est possible.

Les méthodes de reconnaissance des formes sont des outils performants lorsqu'on s'intéresse à une automatisation du diagnostic des systèmes industriels, ceci en raison de leur capacité à réaliser la discrimination des signatures externes généralement interprétées par les spécialistes des matériels surveillés. En effet certaines de ces méthodes sont implantées dans des systèmes de surveillance vibratoire des machines tournantes [DUBU90].

La reconnaissance des formes est une science de définition d'algorithmes qui permettent de classer les objets (ou formes) par comparaison à des prototypes (objets types). Il s'agit de définir à quelle forme-type une forme observée ressemble le plus. Le processus de reconnaissance des formes s'effectue souvent en deux étapes :

- **Étapes de la détection de défauts**

Plusieurs étapes sont nécessaires afin de satisfaire les objectifs de réduction du nombre d'arrêts non planifiés, d'augmentation de la disponibilité, de prévention de l'usure et de maintien de la qualité de l'onde. Dans la littérature, le processus de détection de défauts est généralement divisé en trois étapes [GERT98] :

- Détection du défaut : Déterminer la présence d'une variation sur le système
- Isolation du défaut : Déterminer la localisation du défaut sur le système
- Identification du défaut : Déterminer l'ampleur du défaut

La figure 5.3 résume les différentes étapes décrites de manière séquentielle.

- **Etape de l'observation du procédé**

L'observation du procédé consiste à extraire des données durant une plage d'opération qui est significative pour le type de détection de défauts à effectuer. Par exemple, utiliser des valeurs en régime permanent s'avère un choix judicieux pour la détection des pertes sur les lignes de transport de matières. Dans le cas qui nous intéresse, puisque l'objectif est de déterminer la qualité de l'asservissement, l'observation du procédé est effectuée en régime transitoire.

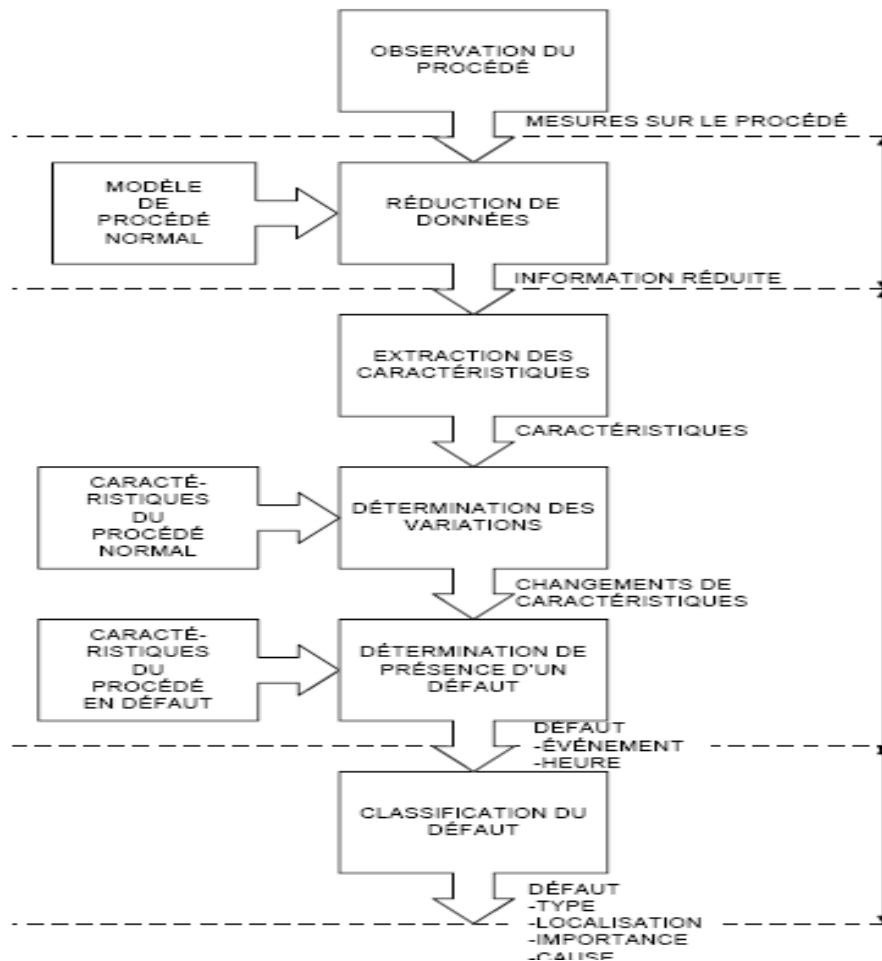


Figure 5.3 : Étapes du processus de détection de défauts

5.5 Réduction des données

La réduction des données consiste premièrement à choisir les signaux qui seront utilisés pour la détection de défauts. Par la suite, il s'agit de choisir la fréquence d'échantillonnage des signaux et le filtre à utiliser afin d'éliminer les bandes de fréquences qui ne sont pas significatives pour la détection des défauts voulus.

5.6 Extraction des caractéristiques

L'extraction des caractéristiques doit faire ressortir les symptômes des défauts. Les exemples présentés dans la littérature utilisant l'analyse multivariable ciblent généralement des défauts menant à des variations des caractéristiques du procédé en régime permanent [CHIA01]. L'intérêt est dirigé vers la détection de défauts affectant les régimes transitoires. Plusieurs méthodes sont employées afin de déterminer les performances de l'asservissement en régime transitoire. La figure 5.4 présente les étapes utilisées

normalement pour l'extraction des caractéristiques en régime permanent et celles qui sont utilisées pour l'extraction des caractéristiques en régime transitoire.

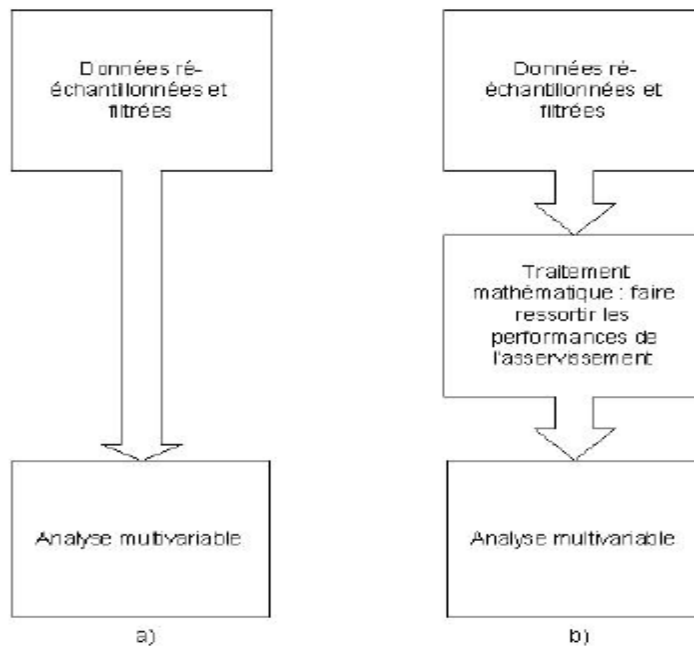


Figure 5.4 : Extraction des caractéristiques du procédé

a) **détection des défauts en régime permanent**

b) **détection des défauts en régime transitoire**

5.7 Détermination des variations

La détermination de la variation d'une variable est jugée par rapport à la valeur obtenue lorsque le procédé fonctionne normalement. La valeur attendue de la variable est trouvée en utilisant des données historiques du procédé pour lequel le comportement était jugé satisfaisant. La variation est la soustraction de la valeur moyenne pour le procédé normal à la valeur obtenue pour l'opération actuelle :

$$\varepsilon_x = \left(\hat{x} - \bar{x} \right) \quad [5.3]$$

Où ε_x : est la valeur de l'erreur sur la variable x pour une observation donnée

\hat{x} : la valeur de la variable pour cette observation

\bar{x} : la valeur moyenne de la variable pour un certain nombre d'observations

En analyse multivariable, le terme observation désigne l'instant où la mesure a été faite alors que le terme variable désigne la valeur du signal mesuré. Par exemple la troisième observation correspond à l'ensemble des mesures effectuées au troisième essai et la

troisième variable correspond à la troisième valeur mesurée ou calculée à partir des mesures.

5.8 Détermination de la présence d'un défaut

Afin de déterminer si un défaut est présent, il faut savoir si la variation de la variable est grande par rapport à la variance observée en fonctionnement normal. En analyse statistique monovariée, la présence d'une variation significative est habituellement conclue si l'écart est plus de trois fois l'écart type en fonctionnement normal, ce qui correspond à un intervalle de confiance de 95%.

$$-3\sigma \leq \varepsilon \leq 3\sigma$$

Où ε : est la valeur du résidu de la variable x par rapport à la moyenne

σ : est la variance du paramètre pour un certain nombre d'essais en fonctionnement normal

5.9 Classification du défaut

L'opération de classification des défauts est la plus intéressante car c'est celle qui pose généralement des problèmes dans le milieu industriel. La classification du défaut réfère à la capacité de localiser précisément la source de la variation de comportement du procédé. Lorsque cette opération n'est pas effectuée correctement, il est possible que le problème soit pallié en introduisant un défaut à un autre endroit sur le procédé dont l'effet masque la présence du défaut initial.

À la base, toute classification de défaut est le fruit de l'analyse de l'information sur les variations des variables. La méthode la plus simple consiste à traiter séparément l'information provenant des variables. Cette méthode est efficace lorsqu'un petit nombre de défauts peut survenir sur le système et que la possibilité qu'elles apparaissent en même temps est faible [CHIA01].

Afin d'améliorer les chances de classer un défaut de manière exacte et automatique dans un système complexe pouvant comporter de multiples défauts, il est possible d'utiliser l'analyse statistique multivariée. En plus de la localisation, ces méthodes permettent d'avoir une idée de l'amplitude du défaut ce qui est un indicateur de l'urgence de remédier à la situation. Cette technique permet de tirer un maximum d'information sur la covariance des variables en fonction des défauts présents sur le procédé. L'utilisation de la statistique multivariée est traitée plus en détail à la section

5.10 Mise en place du système d'aide au diagnostic

5.10.1 Introduction

Depuis leur mise en service, toutes les centrales électrique Algérienne sont équipées de systèmes pour la surveillance vibratoire des groupes turbo alternateurs (GTA), des groupes motopompes (GMP) et des ventilateurs.

Du fait de l'obsolescence et du manque de convivialité de ces systèmes, le développement d'un système de Poste de Surveillance et d'Aide au Diagnostic (PSAD) se voit nécessaire.

Il fédère plusieurs traitements de surveillance organisés par fonction de surveillance. Il intègre la surveillance des GTA des GMP et des ventilateurs ainsi que la surveillance des Structures Internes et la détection des Corps Errants.

Dans ce chapitre nous présentons les fonctions de surveillance GTA, GMP et ventilateurs telles qu'elles sont actuellement et le retour d'expérience dans l'utilisation par les exploitants et les experts des nouvelles méthodes de surveillance.

5.10.2 La surveillance des turboalternateurs

Depuis son installation SONELGAZ a toujours cherché à améliorer la disponibilité et la sûreté de ses centrales électriques. Rétamant la centrale électrique de Annaba a mis en place un système de surveillance pour la détection précoce des anomalies et l'aide au diagnostic des défauts des groupes turboaltemateurs.

Ces systèmes de surveillance permettent de collecter en continu les informations vibratoires fournies par les capteurs d'exploitation montés sur les paliers.

Les traitements effectués sur les signaux vibratoires des paliers ligne d'arbres sont les analyses RMS et synchrone.

Les données collectées, sont traitées par des modules de présentation et d'analyse sur un mini calculateur.

La surveillance vibratoire des pompes et ventilateurs consiste en une acquisition périodique des spectres de déplacement et de vibrations de la carcasse moteur.

Les systèmes de surveillance des GTA sont très efficaces dans la fourniture de données pour l'aide au diagnostic.

Mais, ils commencent à montrer des signes d'obsolescence et certaines limitations ont été identifiées

- Interprétation difficile des données par le personnel des centrales,
- Pas de détection en temps réel,

- Pas d'archivage long terme,
- Pas de communication avec les réseaux de tranche ou avec l'extérieur (le transfert de données se fait par l'envoi de disquettes),
- Peu d'aide à l'interprétation et au diagnostic intégré au système.

L'expérience accumulée avec l'utilisation de ces systèmes de surveillance oblige SONELGAZ à concevoir une nouvelle génération de systèmes de surveillance qui est le POSTE DE SURVEILLANCE ET D'AIDE AU DIAGNOSTIC (PSAD).

5.10.3 Caractéristiques principales de PSAD

Les caractéristiques principales du PSAD sont:

- La détection précoce en ligne des défauts,
- La détermination en temps réel de données pertinentes en terme de diagnostic,
- L'aide au diagnostic pour le personnel de maintenance avec l'utilisation de systèmes experts,
- Une interface homme-machine homogène pour toutes les fonctions de surveillance,
- Des possibilités de transférer tout type de données vers le réseau d'expertise SONELGAZ pour le diagnostiqué par les experts nationaux.

PSAD est conçu avec une architecture logicielle et matérielle flexible, qui permet d'accueillir de nouvelles fonctions de surveillance.

Le PSAD réalise la surveillance vibratoire en continu des GTA, des organes d'admission, des GMP et des ventilateurs.

PSAD peut détecter plus spécifiquement:

- Pour les GTA : les défauts classiques de type déséquilibre, délignage, instabilités de palier, fissuration ...
- Pour les organes d'admission : les ruptures de tige, les difficultés de fermeture,
- Pour les GMP et les ventilateurs : les défauts mécaniques de la ligne d'arbres, les défauts électriques du moteur et les dysfonctionnements des joints,
- Pour l'alternateur : les défauts électriques et mécaniques de type courts-circuits, dissymétrie de dilatation des barres ...

5.10.4 Architecture matérielle

L'architecture matérielle est répartie sur quatre niveaux:

- Au niveau du composant surveillé (GTA, GMP, Ventilateurs, circuit primaire,)
- Au niveau de la tranche: le Poste Principal,
- Au niveau du site: le Poste d'Analyse de Site,
- Au niveau national: le Poste Central d'Analyse.

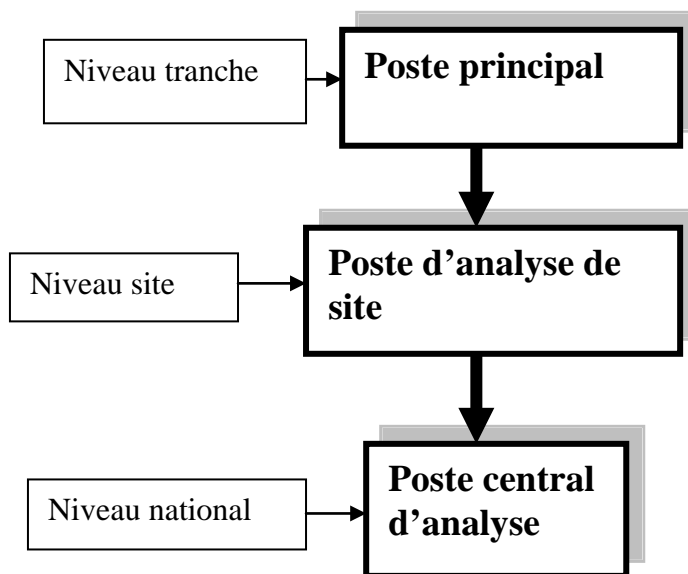


Figure 5.8 : L'architecture matériel de PSAD.

5.10.5 Les systèmes de surveillance

Les systèmes de surveillance, proches des matériels surveillés, réalisent l'acquisition et les traitements temps réel des paramètres acquis sur chaque machine surveillée. A ce niveau, tous les traitements sont automatiques. On y trouve les tâches qui permettent d'améliorer la qualité de l'information (élaboration de descripteurs plus spécifiques, détection des anomalies et réduction de l'information transmise au poste principal).

A - Le Poste Principal:

Le Poste Principal (un par tranche) réalise les traitements hors temps réel d'analyse et de diagnostic pour les différents matériels surveillés. Ce poste principal assure le stockage des

données de surveillance et gère la communication de ces données vers les postes d'analyse. Il dispose d'une interface de présentation graphique des données très performant. Il gère également l'acquisition des paramètres de tranche via le réseau local de la centrale.

B - Le Poste d'Analyse de Site

Le poste d'analyse de site permet de réaliser les restitutions des données stockées sur les postes de tranche (postes principaux). Ce poste est destiné aux opérateurs de maintenance. Il dispose des mêmes fonctionnalités que le Poste Principal hormis la prise en compte des messages d'anomalies et le stockage des données.

C - Les Postes Centraux d'Analyse

Les postes centraux d'analyse sont situés dans les services centraux là où se trouvent les experts nationaux de la production thermique et de la direction des études et recherches. On dispose à ce niveau les mêmes informations et les mêmes capacités de traitement qu'au niveau site pour analyser les données en provenance des sites qui le demandent. Les données peuvent être rapatriés via le réseau national sur abonnement ou sur demande.

5.10.6 Architecture de traitement des données :

On distingue deux types de traitement de données : temps réel et temps différé

5.10.6.1 Traitements temps réel

Les cycles d'acquisition sont chargés de scruter périodiquement les cartes d'acquisition pour en prélever les descripteurs de niveau 1 qui y sont élaborés (RMS, crête, spectres, harmoniques). Ces descripteurs sont convertis directement en unités physiques grâce aux coefficients définis lors de la configuration des capteurs (figure 5.9).

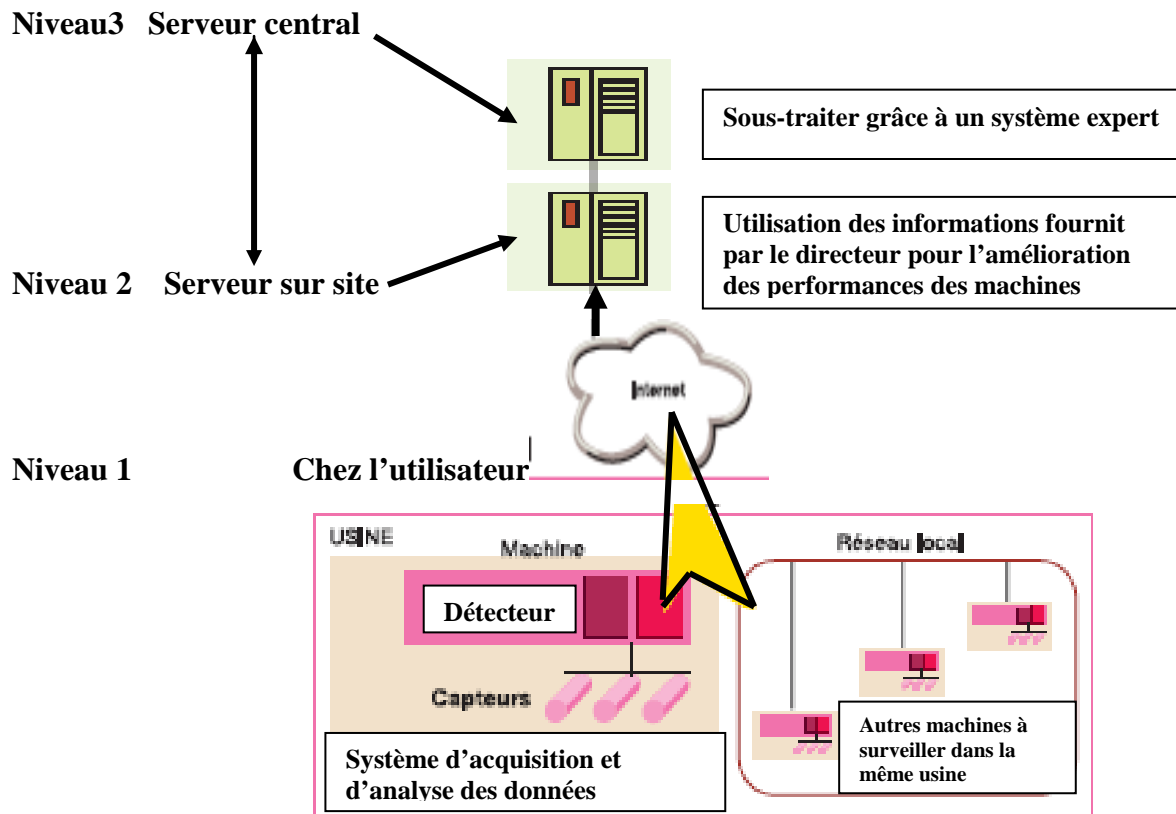


Figure 5.9 : méthodes de suivi en temps réel des installations

Les traitements de niveau 2 sont des traitements rapides du système de surveillance qui sont chargés d'élaborer à partir des descripteurs de niveau 1, les descripteurs plus spécifiques de la surveillance. Ces calculs s'effectuent en ligne, dès la réception des nouveaux descripteurs de niveau 1. Ils incluent le moyennage des descripteurs, la linéarisation de certaines mesures ...

Le système peut délivrer deux principaux types de messages d'anomalies élaborées en temps réel : anomalies liées à la validité des mesures et anomalies liées à la détection d'évolutions.

5.10.6.2 Traitements temps différé

A partir des descripteurs permanents niveaux 1 et 2 stockés dans la base de données, le poste principal du PSAD élabore en temps différé des descripteurs de niveau 3 qui sont également stockés dans la base de données après compression. Exemples: suivi des vitesses critiques (fréquence et amortissement), moyennes long terme, suivi du vecteur écart ...

Des messages d'anomalies d'évolutions dites "lentes" pourront être calculés sur le PSAD en temps différé à partir des descripteurs élaborés par le Poste Principal. Cette fonction est destinée essentiellement à caractériser les modifications évolutives lentes du comportement des machines surveillées. On citera comme exemples les évolutions long terme du niveau moyen vibratoire ou le suivi des paramètres vibratoires modaux.

5.11 Les jonctions de diagnostic dans PSAD

Les utilisateurs peuvent consulter les données et les messages d'anomalies historisés à l'aide d'un logiciel de présentation convivial et de services spécifiques de diagnostic incluant:

- la constitution de contextes (ensembles de messages et descripteurs) utilisables par tous les services de dépouillement,
- un ensemble complet de type de tracé (Nyquist, Bode, cascades, bargraphs ...)
- l'identification automatique des vitesses critiques à la fin de chaque ralentissement pour le GT A,
- la détermination des sensibilités vibratoires aux paramètres d'exploitation pour le GT A,
- le tracé du vecteur écart harmonique 2 pour la détection de fissuration,
- le suivi des temps de fermeture des organes d'admission.

Les avantages du PSAD

Dans l'approche classique, un expert intervient de temps en temps sur le site de production pour collecter les données fournies par les capteurs installés sur un équipement, après quoi il analyse ces données et émet un jugement. C'est un processus long, coûteux et non automatique. Une autre forme de maintenance prédictive est également pratiquée par les entreprises:

La maintenance "continue" où l'outil de collecte de données est installé sur un équipement critique chez l'utilisateur pour l'acquisition automatique des informations.

Ces données sont ensuite transmises à un PC chez un expert qui réalise leur analyse et émet un verdict. La collecte est dans ce cas automatique mais pas l'analyse qui fait toujours appel à un expert. «Le PSAD automatise les deux opérations à la fois : la collecte des informations et leur analyse ».

Quel est donc le secret de ce système qui peut, autre atout important, être intégré à la machine dès sa construction ?

L'outil utilise l'ensemble de capteurs appropriés que possède déjà l'équipement, complété au besoin par d'autres capteurs, suivant les besoins de l'application. Ces capteurs fournissent des informations (les vibrations, l'acoustique, le courant électrique, les efforts, les températures, etc.) à un système intelligent embarqué sur la machine.

Appeler Détecteur, il assure l'acquisition et l'analyse de ces informations et peut se monter sur toutes les machines d'un site industriel reliées par un réseau local. Les informations sont traitées en local par le Détecteur puis transmises à un système expert situé sur un serveur installé soit chez l'utilisateur de la machine soit au niveau du poste central. Ce serveur détecte chaque anomalie avant qu'elle ne se produise.

Le système peut également s'intégrer avec des outils de GMAO pour leur communiquer des informations et faciliter le planning des interventions. C'est le cas actuellement avec le logiciel Coswin.

5.12 Retour d'expérience

L'objectif du retour d'expérience est d'optimiser les plans de maintenance préétablis. La mise en place d'un retour d'expérience démarre par une sensibilisation du personnel, la mise en place et le suivi d'un ensemble de fiches et d'indicateurs [SUH96]. Le retour d'expérience doit donner lieu à des traitements d'analyse de données.

5.12.1 Documents

Les documents nécessaires sont :

- **Rapport d'intervention de maintenance** (rédigé par l'agent de maintenance après toute action, quelle soit interne ou sous-traitée, afin de réaliser un document de suivi des interventions relatif à chaque équipement et d'obtenir les principales informations tel que MTBF, MTTR, nombre d'arrêts...).

- **Demande d'intervention** (les interventions de maintenance sont déclenchées par les opérateurs, mieux placés pour déceler les premiers symptômes des défaillances).

- **Bons de sortie magasin** (permet au moins la ventilation des coûts de pièces par machine).

- **Fiche d'intervention d'opérateur** (les ralentissements et les interventions mineures nombreuses ne sont pas signalés. Ils sont dus généralement au problèmes de convoyages. Il est donc indispensable d'avoir un document rempli par les opérateurs, pour mettre en évidence les micro-défaillances pénalisant la production).

5.12.2 Mise en place d'indicateurs

Il est certain que le taux de rendement synthétique TRS [PIM91] est le meilleur indicateur pour cibler les actions prioritaires permettant de faire face aux points faibles de la productivité.

L'exemple ci-dessous illustre d'application de cette méthode pour un système pendant 8 semaines .

Semaines	Disponibilité		T de performance		Taux de qualité		TRS %	
	Réalisé	Objectif	Réalisé	Objectif	Réalisé	Objectif	Réalisé	Objectif
S1	98.13	100	84.06	91.67	94.38	100	77.85	91.67
S2	96.25	100	93.25	91.67	94.38	100	84.71	91.67
S3	95.63	100	90.54	91.67	94.38	100	81.71	91.67
S4	100	100	91.25	91.67	94.96	100	87.31	91.67
S5	98.3	100	93.98	91.67	94.96	100	87.71	91.67
S6	98.75	100	88.56	91.67	94.96	100	83.04	91.67
S7	98.13	100	88.03	91.67	94.96	100	82.02	91.67
S8	93.75	100	89.14	91.67	94.96	100	79.35	91.67

Figure 5.10: Exemple de suivi TRS

5.12.3 Objectifs du retour d'expérience dans le PSAD

Le prototype industriel de PSAD doit intégrer la surveillance des GMP, des GTA et des ventilateurs et communique avec le calculateur de tranche pour l'acquisition des grandeurs d'exploitation. Ce qui signifie que :

- PSAD assure les fonctionnalités spécifiées tant au niveau de la centrale qu'au niveau national,
- PSAD élabore et sauvegarde des informations nécessaires à la mise en place d'une maintenance prédictive des matériels surveillés,
- les nouvelles méthodes de surveillance sont opérationnelles et permettent d'affiner la connaissance du comportement des machines.

Le retour d'expérience permis de dégager des actions d'amélioration, qui concernent l'interface homme machine et l'intégration de nouveaux services de diagnostic.

5.13 Aide au diagnostic en ligne

Un service d'Aide au Diagnostic doit être mis en place. A l'apparition d'un message d'anomalie et de façon générale dès qu'un message d'anomalie est manipulé, une fiche d'aide au diagnostic est consultable en ligne.

L'objectif de cette fiche est :

- d'expliciter le contenu du message,
- de guider l'opérateur pour le dépouillement à effectuer afin de rechercher le ou les défauts à l'origine du message d'anomalie.

L'opération de diagnostic consiste d'abord à utiliser les symptômes observés pour envisager les défauts possibles, puis à confirmer les hypothèses émises. La fiche proposée permet de rechercher les informations nécessaires à l'évocation d'hypothèses.

Ainsi, par exemple, en cas de message «détection d'un défaut sur un palier turbine », la fiche de diagnostic va conseiller de rechercher la localisation principale du défaut, les harmoniques concernées et les corrélations avec les paramètres d'exploitation. En fonction des réponses, les défauts de type «glissement d'accouplement» et « perte d'ailette» pourront être évoqués.

La confirmation finale de la présence des défauts consiste à comparer le phénomène à diagnostiquer avec ce qui est décrit dans les fiches de défauts ou d'incidents.

Cette aide en ligne n'est pas automatique mais elle permet à l'opérateur de réaliser une analyse optimale des données de surveillance lors de l'apparition d'un message.

5.14 Bilan de comportement des machines

Cette fonctionnalité permet à l'opérateur d'obtenir notamment pour la préparation des opérations de maintenance tous les éléments de comportement du GTA, des pompes et des ventilateurs pour une période fixée.

Le service de bilan de comportement permet de faire un récapitulatif de l'état d'une machine à un instant donné ou pour un régime de fonctionnement particulier (montée en vitesse et ralentissement pour les GTA, vitesse nominale).

Le résultat se présente sous forme de tableaux de valeurs numériques ou sous forme de listes de messages d'anomalie, que l'opérateur peut consulter et imprimer.

Les présentations nécessaires sont:

- un tableau paramétrable avec les valeurs numériques de descripteurs pendant un état stabilisé du régime de fonctionnement de la machine;
- un tableau paramétrable des valeurs maximum atteintes par l'amplitude/phase des harmoniques et par la valeur RMS des vibrations lors des ralentissements et des montées en vitesse;
- un récapitulatif des messages d'anomalies fonctionnelle pour les régimes de fonctionnement "vitesse nominale" et "transitoire de vitesse".

Plusieurs cas de fissuration des développantes des stators alternateur pouvant conduire à des incidents graves.

Afin de détecter de façon précoce ces dégradations, des capteurs de vibration piézo-électriques sont installés. Une fonction de surveillance spécifique doit être conçue dans le PSAD. Son objectif est de détecter précocement les évolutions des vibrations à 100 Hz. Cette surveillance doit être enrichie par le suivi spectral des vibrations des développantes, le suivi des températures stator, la détection des fuites hydrogène et le suivi des paramètres électriques.

Des modèles de comportement thermique et vibratoire permettront de tenir compte de l'influence des paramètres d'exploitation.

5.15 Suivi des performances thermo hydrauliques

Les performances hydrauliques des pompes primaires ont évolué lors des essais à chaud. Pour détecter ces évolutions, un système PSAD doit comporter, en plus des fonctionnalités classiques de surveillance des pompes et des ventilateurs, une fonction de suivi des performances hydrauliques.

Ce suivi se fait à partir des mesures de débit, de la puissance sur l'arbre (puissance électrique moins les pertes) et de la puissance sur l'arbre recalée en débit et température de réfrigération (cette dernière donnée permet de détecter des évolutions de performances hydrauliques des pompes car elle s'affranchit de toutes variations extérieures à la pompe).

Ces calculs sont effectués automatiquement en niveau 2 par le système de surveillance.

5.16 Suivi des températures palier

Depuis le démarrage des turboalternateurs, les paliers reçoivent quelques dégradations de régime, pouvant conduire à une destruction complète. L'analyse des incidents régule marquants montre que le suivi des vibrations ne permet pas de les mettre en évidence. Par contre, dans tous ces incidents, l'observation des températures aurait pu le permettre.

Pour cela il est conseillé d'installer uniquement un poste principal qui communique exclusivement avec un ou plusieurs calculateurs de tranche pour la récupération des mesures de températures des paliers.

Cette solution permet de réaliser des économies substantielles, en évitant d'installer un système de surveillance (câblage des mesures, acquisition ...).

Le système peut élaborer des messages d'anomalie en transitoire de vitesse et en marche nominale. On retiendra principalement que le déclenchement est basé sur les écarts entre les températures du palier avant et arrière, sur la valeur absolue de la température et sur l'élévation ou la baisse de température.

Comme la solution ne comporte pas de système de surveillance, tous les calculs et l'élaboration des messages sont réalisés en niveau 3 par le poste principal.

5.17 Conclusion

Les choix de contexte de détection et de signaux mesurés effectués au cours de ce chapitre permettent d'utiliser efficacement les méthodes de détection de défauts sélectionnées sur les générateurs hydroélectriques et de rencontrer les objectifs énumérés. Les variables mesurées ont été choisies afin que le système soit implantable dans toutes les centrales qui sont instrumentées au minimum. Le choix du démarrage pour la détection n'influence pas la qualité de l'électricité fournie au client et a un effet minime sur la quantité d'électricité produite tout en assurant que le générateur est bien régulé avant de le raccorder à des clients. La variété des méthodes utilisées devrait permettre de détecter et de localiser les défauts linéaires et non linéaires présentés.

L'intégration de toutes les méthodes de diagnostic permet de tirer le maximum d'information sur l'état du procédé et de la présenter sous forme de graphique facile à interpréter pour les opérateurs.

La mise en place d'un poste de surveillance d'aide au diagnostic (PSAD) permet de cibler efficacement les actions de maintenance à mettre en place. La démarche conduite permet d'intervenir rapidement et efficacement lors de n'importe quelle défaillance du système de production.

L'objectif du projet est de permettre à terme, à l'aide d'outils adaptés, la réalisation régulière de ce genre d'analyse pour garantir le niveau de rendement des installations, ainsi que le suivi des performances grâce au retour d'expérience.

Conclusion

Conclusion générale et perspective

Les objectifs de la maintenance sont de diminuer le nombre d'arrêts non planifiés, d'augmenter la disponibilité des équipements, d'éviter les détériorations de l'équipement et d'assurer la qualité du produit fabriqué.

Lors de la préparation de cette thèse, les résultats obtenus nous ont permis de présenter la conclusion générale suivante :

Le premier chapitre nous a permis de situer l'importance de la maintenance et son influence sur les performances des machines dans la logique industrielle actuelle dominée par la recherche permanente de l'amélioration des systèmes de production. Nous avons également dégagé l'intérêt du calcul des coûts de maintenance sur la mise en place d'une politique de maintenance adéquate.

Cette constatation ne peut être justifiée que par la réalisation d'une étude bibliographique sur la disponibilité des installations présentée au chapitre 2. Cette étude bibliographique nous a permis de constater que les méthodes de maintenance appliquées actuellement n'étaient pas toujours satisfaisantes dans la résolution des problèmes de disponibilité car elle ne dépasse jamais les 60% dans le cas de la centrale électrique de Annaba que nous avons prise comme échantillon. D'où la nécessité de développer de nouvelles techniques de maintenance proposées dans le chapitre 3.

Dans le chapitre 3 nous avons présenté une nouvelle vision de la maintenance appelée maintenance prédictive. L'objectif de cette technique est l'amélioration de l'outil de maintenance mais également une intégration plus forte de la gestion de la maintenance dans la gestion de la production. Avec elle, les responsables de la maintenance sont à même de gérer de façon plus efficace les opérations de maintenance, en suivant une planification liée aux impératifs de la production. Les équipes n'interviennent plus que lorsque cela s'avère véritablement nécessaire, avec une grande réactivité, lorsque l'un des paramètres mesurés dépasse une valeur critique, ou lorsque l'analyse des données recueillies révèle l'apparition prochaine d'une défaillance. Parce qu'elles garantissent une plus grande compétitivité, ces évolutions constituent aujourd'hui un enjeu majeur pour les industriels. Les techniques présentées dans ce chapitre montrent Les avantages de la surveillance vibratoire permanente par rapport aux autres types de surveillance. Ce que nous avons développé dans le chapitre 4.

Conclusion

L'amélioration de la disponibilité des matériels et de la sécurité des personnes passe par l'utilisation de techniques avancées telles que l'analyse du comportement vibratoire. Ce type d'analyse prend actuellement un essor important dans le cadre de la mise en place d'une maintenance prédictive. L'analyse vibratoire est une activité pluridisciplinaire qui fait appel à différentes techniques telles que le traitement du signal, la modélisation par éléments finis ou l'analyse statistique ...

La première partie du chapitre 4 consiste à rappeler les principes de base de l'analyse vibratoire appliquée à la maintenance prédictive et les notions de base de dynamique appliquée sur les machines.

La deuxième partie est consacrée à la mise en œuvre d'une surveillance permanente et en ligne appliquée à un turboalternateur d'une centrale électrique (cas de la centrale électrique de Annaba). Les résultats obtenus montrent l'importance de la surveillance continue des machines tournantes et leur participation à l'amélioration de la disponibilité.

Le problème rencontré lors de la réalisation de ce travail est le manque de spécialistes qualifiés en diagnostic des défaillances sur site. L'attente de l'arrivée de ces spécialistes dure parfois quelques jours. Pour cela nous avons proposé la mise en place d'un poste de surveillance et d'aide au diagnostic qu'on a développé son rôle et ses fonctions dans le chapitre 5.

Dans ce chapitre nous avons proposé un outil de supervision/diagnostic en ligne de l'ensemble des centrales électriques en Algérie. Ces travaux ont été basés sur l'exploitation des données acquises sur le système surveillé. Cette stratégie suppose deux étapes : la première consiste dans le développement d'une technique de diagnostic permettant de prédire en ligne les défaillances des machines.

La deuxième étape consiste à la mise en place d'un poste de surveillance d'aide au diagnostic (PSAD) qui permet de cibler efficacement les actions de maintenance à mettre en place. La démarche PSAD permet d'intervenir rapidement et efficacement lors de n'importe quelle défaillance du système de production.

La mise en place d'un PSAD permet à terme, à l'aide d'outils adaptés :

- la réalisation régulière de tout type d'analyse en temps réel,
- garantir le niveau de rendement des installations,
- suivre les performances grâce au retour d'expérience,
- réduire le temps d'intervention,
- réduire le coût de maintenance.

Conclusion