

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

Faculté : Sciences de L'Ingéniorat

Département : Électromécanique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Contribution à l'amélioration de la maintenance prédictive dans l'industrie

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Spécialité : Maintenance Industrielle

Par : ARAB MUSTAPHA

DEVANT LE JURY

Président : KABOUCHE. A. U.B.M. Annaba

Directeur de mémoire : KABOUCHE. A. U.B.M. Annaba

Examineur : BOURAS. AK. U.B.M. Annaba

Examineur : BERKANI. M. U.B.M. Annaba

Année 2019

Dédicaces

A mes chers parents quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point vous remercier comme il se doit. Votre affection me couvre, votre bienveillance guide et votre présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles. Que ce travail traduit ma gratitude et ma reconnaissance envers vous.

A mes encadrants, s'il y a vraiment quelqu'un à remercier, ce sera Monsieur Abdallah Kabouche, merci pour vos efforts très louable.

A mes chers professeurs de tous les départements en particulier à ceux du département d'électromécanique.

A mes frères et sœurs, cousins et cousines

A tous mes amis, à tous ceux qui me sont chers.

Je dédie cet humble travail.

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu de m'avoir donné la force pour accomplir ce travail. Ensuite, je remercie mon encadreur Monsieur Abdallah Kabouche pour ses conseils et ses directives.

Ainsi tous les enseignants et enseignantes du Département d'électromécanique.

Aussi un grand remerciement à mes parents pour leur participation à la réalisation de ce Mémoire de Fin d'Etudes, et sans oublier toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Résumé

Ce travail d'initiation à la recherche traite la contribution à l'amélioration de la maintenance prédictive dans les industries. L'expression maintenance est grandement liée à l'industrie, elle se retrouve entièrement connectée et prédictive aux systèmes de production dans le cadre de l'usine du futur. Elle devient une force majeure, et le premier garant de la productivité de l'entreprise. Les systèmes machines de production se placent au cœur de l'usine moderne, autrefois considérée comme faisant partie des frais généraux de l'entreprise, la maintenance, de par son personnel au plus près des équipements de production, peut s'avérer être une véritable source de données et de profit.

Une maintenance prédictive ou les GMAO de dernière génération chamboulent ce domaine de compétences de part leur approche proactive.

L'organisation d'un service maintenance (grâce aux technologies) est alors optimisée tout en permettant à l'entreprise des gains considérables en efficacité et de productivité.

Abstract

Work of introduction to research deals with the contribution to the improvement of predictive maintenance in industries. The term maintenance is closely linked to the industry; it is fully connected and predictive to the production systems in the framework of the factory of the future. It becomes a force majeure, and the first guarantor of the productivity of the company. The production machinery systems are placed at the heart of the modern factory, formerly considered as part of the general expenses of the company, maintenance, by its staff closer to the production equipment, can prove to be a real source of data and profit. Predictive maintenance or last-generation GMAO are shaking up this area of expertise because of their proactive approach. The organization of a maintenance service (thanks to the technologies) is then optimized while allowing the company considerable gains in efficiency and productivity.

ملخص

يتعامل هذا العمل من مقدمة الأبحاث مع المساهمة في تحسين الصيانة التنبؤية في الصناعات. يرتبط مصطلح الصيانة ارتباطاً وثيقاً بالصناعة ، وهو مرتبط بالكامل ويتنبأ بنظم الإنتاج في إطار مصنع المستقبل. يصبح قوة القاهرة ، وأول ضامن لإنتاجية الشركة. يتم وضع أنظمة آلات الإنتاج في قلب المصنع الحديث ، الذي كان يُعتبر سابقاً جزءاً من المصاريف العامة للشركة ، ويمكن أن يثبت أن الصيانة ، بواسطة موظفيها الأقرب إلى معدات الإنتاج ، حقيقية مصدر البيانات من الجيل الأخير على هز مجال GMAO والربح. . تعمل الصيانة التنبؤية أو الخبرة هذا نظراً لنهجها الاستباقي. . ثم يتم تحسين تنظيم خدمة الصيانة (بفضل التقنيات) مع السماح للشركة بمكاسب كبيرة في الكفاءة والإنتاجية.

Table des matières

dedicate.....	I
Remerciements.....	II
Résumé.....	III
Abstract.....	IV
ملخص	V
Table des matières	VI
Liste des figures.....	VIII
Liste des tableaux.....	IX

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Concepts de la maintenance

1.1 Introduction.....	4
1.2 Rôle de la maintenance	5
1.3 Les clés d'une bonne maintenance.....	6
1.4 Les différents types de maintenance.....	6
1.4.1 Maintenance corrective	8
1.4.2 Maintenance curative	8
1.4.3 Maintenance palliative.....	9
1.4.4 Maintenance préventive.....	9
1.4.5 Maintenance préventive systématique.....	9
1.4.6 Maintenance préventive conditionnelle.....	10
1.4.7 Maintenance préventive prévisionnelle.....	11
1.4.8 Maintenance proactive.....	11
1.4.9 Maintenance prédictive.....	12
1.5 Maintenance dans une approche fondée sur la fiabilité	12
1.6 Conclusion.....	15

Chapitre II : la maintenance prédictive

2.1 Introduction.....	17
2.2 Définition de la maintenance prédictive	19
2.3. Les trois phases pratiques de la maintenance prédictive.....	19
2.3.1- La détection du défaut qui se développe.....	20
2.3.2-L'établissement d'un diagnostic.....	21
2.3.3- La notion de fiabilité d'un système.....	21
2.4- Relation entre la maintenance et la fiabilité.....	23
2.5-Divers outils de la maintenance prédictive.....	24
2.6 Avantages de la maintenance prédictive par rapport à la préventive.....	25
2.7- Avantages de la maintenance prédictive au service de la productivité de l'entreprise	26
2.8- Intérêt économique de la maintenance prédictive.....	26
2.9- Les services de la maintenance prédictive en technique de surveillance.....	27
2.10- Conclusion.....	29

Chapitre III : les techniques de la maintenance prédictive

3.1 Introduction	31
3.2 Définition de la thermographie infrarouge.....	32
3.3 Traitement des données	33

3.4 Exemple d'application sur matériaux métalliques	34
3.5 Domaine d'application de la thermographie	37
3.6 avantage des sources thermiques.	37
3.7 Définition du contrôle ultrasonore	38
3.8 Appareillages utilisés	39
3.9 Application du contrôle ultrasonore.....	40
3.10 Limites de contrôle ultrasonore.....	41
3.11 Exemple suivi des contrôles d'épaisseur des citernes	42
3.12 Rôle des huiles industrielles.....	43
3.13 Les différents types d'huiles.....	43
3.14 Les caractéristiques des huiles industrielles.....	43
3.15 Les analyses des huiles industrielles.....	44
3.16 Analyse de dégradation des lubrifiants.....	46
3.17 Contamination des lubrifiants.....	48
3.18. L'analyse vibratoire.....	51
3.19 Principe de l'analyse vibratoire.....	51
3.20 Analyse spectrale.....	48
3.21 Méthodes de mesure par les capteurs.....	53
3.22 Surveillance continue.....	57
3.23 Exemple d'un point de mesure.....	58
3.24 Conclusion	60
4. conclusion générale.....	61
Bibliographie.....	62

Liste des figures

Figure 1.1 contenu de la fonction maintenance.....	5
Figure 1.2 organigramme de différentes méthodes de la maintenance	7
Figure 1.3 courbe représentant l'arrêt de production dû à une défaillance.....	8
Figure 1.4 montre le principe de la maintenance préventive systématique.....	10
Figure 1.5 approche du concept MBF.....	12
Figure 1.6 mise en place d'une boule d'amélioration et d'un retour d'expérience.....	13
Figure 2.1 Représentation graphique des amplitudes vibratoire ainsi que leur évolution dans le temps.....	20
Figure 2.2 Suivi de l'évolution du défaut par la surveillance prédictive	20
Figure 2.3 courbe baignoire.....	22
Figure 2.4 l'impact de la maintenance sur la fiabilité des équipements	23
Figure 2.5 optimisations de la politique de maintenance	27
Figure 3.1 Contrôle de défaut de calorifuge par thermographie sur un équipement sous pression.....	32
Figure 3.2 Traitement des données basées sur la recherche du maximum de contraste entre une zone saine et une zone endommagée (Thermal Wave Imaging)	33
Figure 3.3: Mesure d'épaisseur de revêtement céramique sur pièce métallique par thermographie active avec excitation par laser (edevis).....	34
Figure 3.3.a image de phase.....	34
Figure 3.3.b profil vertical le long de la ligne rouge.....	35
Figure 3.4 contrôle par thermographie infrarouge active d'un décollement de revêtement.. céramique sur un substrat en fonte.....	36
Figure 3.4.a image avant excitation.....	36
Figure 3.4.b image 1 seconde après excitation.....	36
Figure 3.5 contrôle d'un groupe motopompe par ultrasons.....	38
Figure 3.6 exemple de contrôleur avec casque d'écoute.....	39
Figure 3.7 exemple de capteur utilisé en contrôle ultrasonore.....	39
Figure 3.8 contrôle ultrasonique d'un moteur.....	40
Figure 3.9 détérioration d'un isolateur de ligne par l'effet corona.....	40
Figure 3.10 instruction technique mécanique de la cuve acide.....	42
Figure 3.11 exemple d'ampoule à décanter.....	46
Figure 3.12 viscosimètre à billes.....	47
Figure 3.13 principe de fonctionnement d'un viscosimètre.....	47
Figure 3.14 pompe à vide.....	48
Figure 3.15 appareillage pour le contrôle de la pollution.....	48
Figure 3.16 membrane filtrante.....	49
Figure 3.17 composition de l'appareil de contrôle de la pollution gravimétrique.....	49
Figure 3.18 grandeurs associées à l'amplitude d'une vibration.....	52
Figure 3.19.a signal temporel.....	54
Figure 3.19.b forme spectrale.....	54
Figure 3.20 signal périodique.....	54
Figure 3.21 accéléromètre piézo-électrique.....	55
Figure 3.22 capteur électrodynamique.....	56
Figure 3.23 capteur de déplacement.....	56
Figure 3.24 système de surveillance continue.....	57
Figure 3.25 point de mesure.....	58
Figure 3.26 exemple de mesure de vibration d'un turbocompresseur.....	59

Liste des tableaux

Tableau 1.1 comparaison entre maintenances.....	14
Tableau 2.1 comparaison des techniques de maintenance.....	28
Tableau 3.1 exemple des résultats des analyses sur les membranes filantes.....	50
Tableau 3.2 différent types de vibration.....	53

Introduction générale

La maintenance est l'une des composantes vitales de l'industrie un enjeu clef pour la durabilité des machines et des installations mécaniques ainsi que pour l'accroissement de la productivité des unités de production

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. La sécurité opérationnelle, l'optimisation des coûts de maintenance et la disponibilité des équipements ont un impact direct sur la compétitivité des unités de production. Les machines complexes, sophistiquées et avancées d'aujourd'hui, exigent des stratégies d'entretien appropriées et coûteuses. D'où la nécessité de développer et d'améliorer en permanence les programmes d'entretiens courants

Il s'agit de mettre en place des actions de maintenance basées sur la prévention des défaillances à partir d'analyses fiabilistes, ou basées sur l'analyse de fonctionnement en temps réel des systèmes ou des composants. Bazovsky [1] introduit l'utilisation de méthodes d'optimisation mathématique dans les politiques de maintenance préventive

Jardine [2] a introduit des modèles de décision pour la détermination des intervalles de révision par l'analyse de la fiabilité donnée (par exemple les événements historiques de dépannage) et les coûts. Toutefois, la politique de maintenance basée sur la fixation des intervalles de temps n'a pas été bien reçue par la plupart des praticiens [3].

Il s'agit de se disposer d'une usine avec zéro panne l'idéal de tout industriel. On peut l'atteindre, par la stratégie de maintenance privilégiée, **dite prédictive**. Allant plus loin que celles curative et même préventive, la maintenance prédictive repose sur une surveillance permanente des machines rendue possible par les nouvelles technologies : des capteurs d'analyse vibratoire permettant la collecte de données ,l'image fiable des défauts générés, des instruments de mesure acoustique utilisant les ultrasons , capables de détecter les défauts mécaniques, électriques ou d'étanchéité, des capteurs relevant de la thermographie (surveillance des niveaux de température)

Il s'agit de prévoir et d'anticiper les pannes et défaillances en s'appuyant sur la récolte d'un maximum de données et d'en assurer l'analyse au service de la prise de décision. L'usine du futur mise grandement sur cette maintenance.

Le principal intérêt que présente cette dernière est qu'elle promet de réduire significativement les arrêts de production non planifiés, surtout lorsque les techniques utilisées sont non-invasives (capteurs qui ne sont pas placés à l'intérieur des machines et ne nécessitent donc pas d'en interrompre le fonctionnement). Ce qui constitue un gage d'amélioration de la productivité.

Le premier chapitre présente les concepts nécessaires à la compréhension de la maintenance prédictive. Dans un premier temps, les concepts de maintenance sont exposés. Par la suite, les politiques de maintenance sont présentées par rapport à l'intérêt économique et technique poursuivis par la maintenance des équipements industriels. Enfin la maintenance prédictive est décrite et l'intégration des vibrations (paramètre de contrôle) est mise en évidence pour la surveillance des machines tournantes.

Le deuxième chapitre énonce et analyse les principes de mise en œuvre de la maintenance prédictive, relève son intérêt économique et technique, justifie son choix en regard de toutes les techniques de maintenance. Ils présentent les différentes méthodes utilisées pour la détection des défauts sur les machines industrielles par le contrôle des vibrations.

Le dernier chapitre concerne les techniques de la maintenance prédictive, l'analyse des huiles, la thermographie infrarouge, la détection ultrasonique les vibrations mécaniques, et leurs évaluations dans le cadre de la maintenance prédictive, l'analyse de ces derniers ainsi que les informations indispensables pour leurs traitements.

Chapitre1

Concept de la maintenance

1-1 Introduction

La maintenance est amenée à prendre une importance croissante au fur et à mesure que les équipements deviennent de plus en plus sophistiqués, constituant à la fois une nécessité impérative et un moyen d'optimiser la disponibilité effective des équipements, et donc l'efficacité des entreprises. Elle n'a pas toujours comme seul objectif de réparer l'outil de travail mais aussi de prévoir et éviter les dysfonctionnements.

Pour une entreprise, l'enjeu se présente comme suit :

- □ Les arrêts de production suite à une panne coûtent cher
- □ La maintenance préventive systématique n'est pas toujours rentable
- La maintenance prédictive, avec l'utilisation de nouvelles technologies est une voie de recherche intéressante .

Notre mission est de mettre à disposition des outils de détection des défauts mécaniques des machines tournantes, par analyses vibratoires. Ces outils de maintenance nous offrent une compréhension immédiate des phénomènes par une démarche automatique du diagnostic via les signaux vibratoires .

Une machine en état de fonctionnement exige des opérations de maintenance qui permettent d'éviter des catastrophes et d'augmenter sa disponibilité. Le diagnostic basé sur le comportement vibratoire fait partie des programmes de maintenance et caractérise les états normaux et anormaux des machines. En effet les défauts les plus dangereux sont générés à partir des éléments tournants (rotors, disques, roulements, engrenages, accouplements, courroies, balourds, etc.), et provoquent des efforts localisés ou répartis qui induisent des mouvements vibratoires régis par la fonction de transfert de la machine.

1.2- rôle de la Maintenance

Dans les entreprises, la maintenance est considérée comme fonction stratégique et est définie comme étant un ensemble des actions techniques, administratives et de management destinées à maintenir un bien industriel en bon état de marche durant un cycle de vie ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise [4-6].

Retour. [7] présentent la fonction maintenance est comme un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles: les activités à dominante technique et les activités à dominante gestion [7] (voir Figure 1.1).

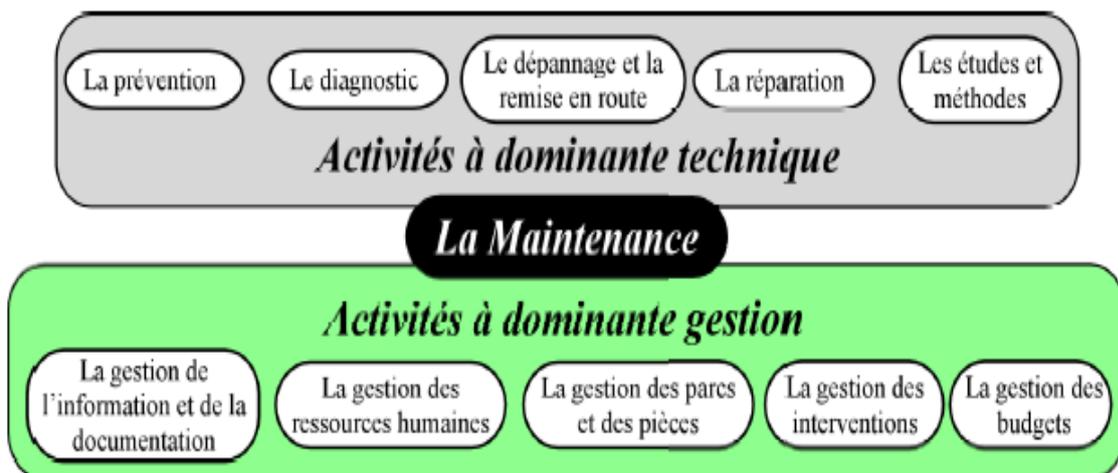


Figure 1.1 : le contenu de la fonction maintenance- (Retour [7])

Dans la définition de la maintenance, nous trouvons deux mots-clés : maintenir et rétablir. Le premier fait référence à une action préventive. Le deuxième fait référence à l'aspect correctif. Nous présentons dans les paragraphes qui suivent les définitions de chaque type de maintenance.

1.3-Les clés d'une bonne maintenance

a) Sur les machines

- Répertorier et numéroter l'ensemble des machines et collecter les informations disponibles sur chacune d'elles.
- Etablir un dossier technique pour chaque machine.
- Déterminer le niveau de criticité de chaque équipement (influence d'une panne sur le reste de la production).

b) Avec les opérateurs

- Engager une action de formation pour expliquer ce qu'est la maintenance.
- Confier aux opérateurs des tâches simples : graissage, nettoyage, observations visuelles sur l'état des machines.
- Les inciter à signaler toute anomalie ou incident.

c) Avec le service de maintenance

- Formaliser l'ensemble des procédures : gestion des pièces de rechange, fiches de recueil des observations, etc.
- Etablir un programme prévisionnel avec un suivi des actions entreprises.
- Concentrer les équipes internes sur les actions les plus critiques et sous-traiter les tâches trop spécifiques ou à faible valeur ajoutée.

1.4-Les différents types de maintenance

Il existe deux grands types de maintenance : la maintenance corrective et la maintenance préventive. La maintenance corrective comprend la maintenance palliative ou maintenance de catastrophe. De son côté, la maintenance préventive se subdivise en maintenance systématique, conditionnelle et prédictive. La figure 1.2 présente l'organisation de ces différents types de maintenance.

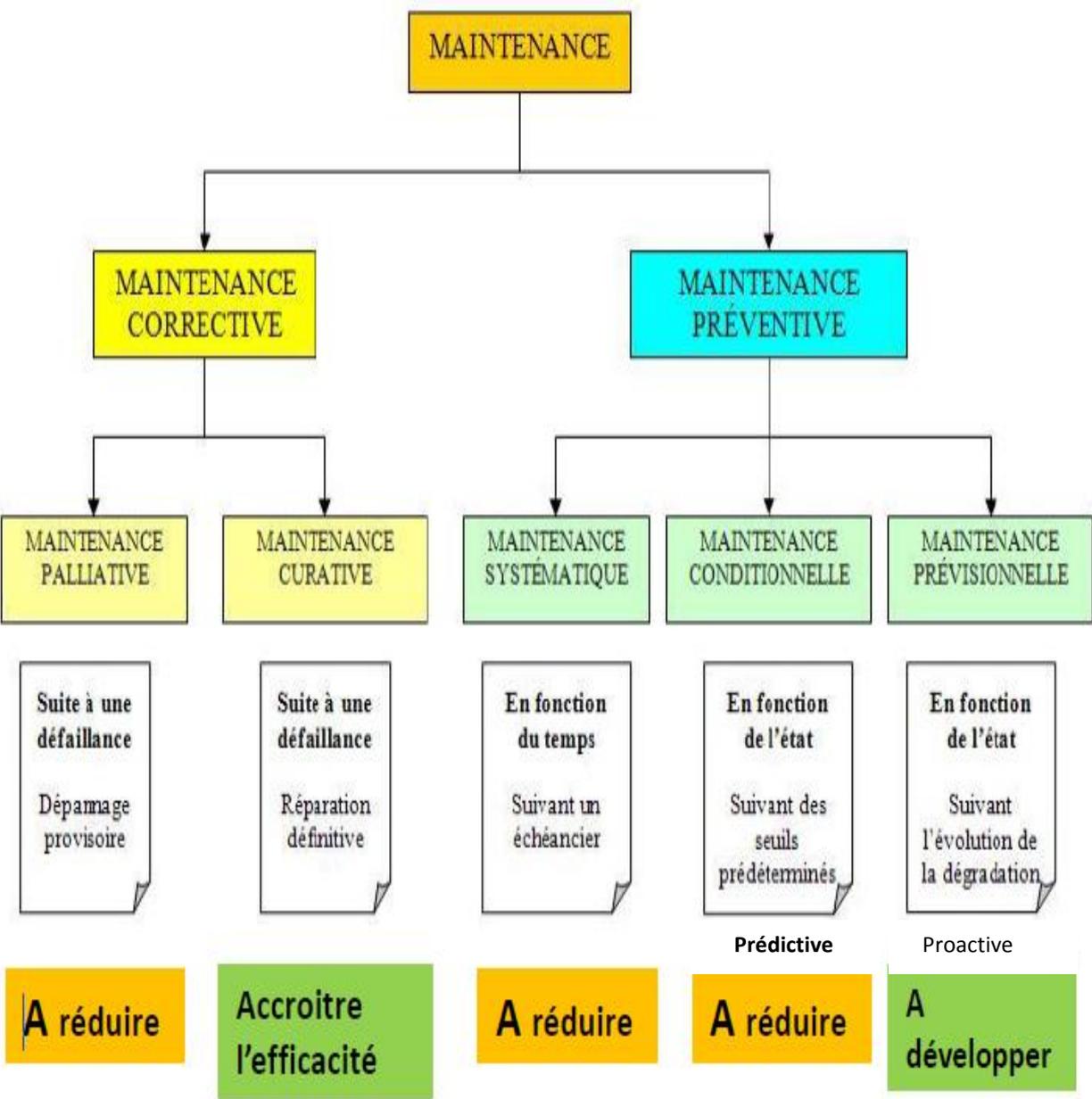


Figure 1.2 : Organigramme de différentes méthodes de la maintenance

1.4.1-Maintenance corrective

La maintenance corrective est exécutée après une panne ou une défaillance Elle est destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise Par ailleurs, elle permet de repérer et de corriger la source de la défaillance, lorsque l'avarie n'est ni progressive ni graduelle, pour éviter les incidents répétitifs. La maintenance corrective, comprend deux types d'intervention :

- Les interventions palliatives qui remettent le système en état de fonctionnement Provisoire, le dépannage.
- Les interventions curatives permettant de réparer le système d'une manière définitive. [8]

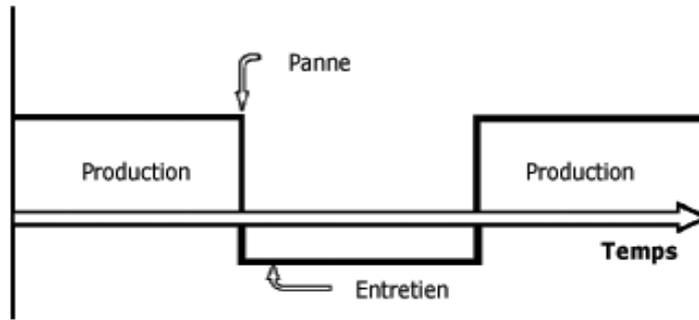


Figure 1.3 : courbe représentant l'arrêt de production dû à une défaillance. Cette dernière, non prévue, se traduit par un arrêt brusque de la production.

1.4.2-Maintenance curative

Ce type de maintenance permet de remettre définitivement en état le système après l'apparition d'une défaillance. Cette remise en état du système est une réparation durable. Les équipements réparés doivent assurer les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus. Une réparation est une opération définitive de la maintenance curative qui peut être décidée soit immédiatement à la suite d'une défaillance, soit après un dépannage, ce type de maintenance, provoque donc une indisponibilité du système. [9]

1.4.3-Maintenance palliative

La maintenance palliative revêt un caractère temporaire, provisoire. Elle est principalement constituée d'opérations qui devront toutefois être suivies d'opérations curatives (réparations). Le dépannage est une opération de maintenance palliative qui est destinée à remettre le système en état provisoire de fonctionnement de manière à ce qu'il puisse assurer une partie des fonctions requises. Les opérations de dépannage sont souvent de courte durée et peuvent être nombreuses, et parce qu'elles ont lieu souvent ; elles sont également très coûteuses [9,10].

1.4.4-Maintenance préventive

La maintenance préventive est destinée à réduire la probabilité de panne du système, à suivre l'évolution de l'état d'un organe, de manière à prévoir une intervention dans un délai raisonnable et l'achat de la pièce de remplacement nécessaire (donc on n'a pas besoin de la tenir en stock, si le délai normal le permet).

La maintenance préventive systématique ainsi que la maintenance corrective sont les formes traditionnelles de la maintenance. La première constitue encore aujourd'hui une activité fondamentale alors que la seconde est de plus en plus remplacée par une maintenance préventive conditionnelle qui, comme la maintenance prédictive, témoigne des nouvelles tendances en matière de maintenance. Toutes deux s'appuient sur les progrès informatiques et mettent en œuvre des techniques de diagnostic sophistiquées.

—La maintenance préventive comprend :

- Maintenance préventive systématique, (Contrôles, remplacements systématiques)
- Maintenance préventive conditionnelle, ou contrôles non destructifs. (Prédictive)
- Maintenance préventive prévisionnelle. (Proactive)

1.4.5-Maintenance préventive systématique

La maintenance préventive systématique est soumise à un programme et à un échéancier fixe dans le but de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'une machine de fabrication. Il s'agit d'une maintenance proactive plutôt que

réactive, « pensée en amont de l'exploitation » [11]. De plus, elle ne présente pas de réelles garanties quant à la fiabilité des machines. En revanche, la surveillance en état de marche s'avère parfois moins dommageable que des arrêts ponctuels qui permettent d'examiner le degré d'usure. La maintenance systématique a donc été rapidement écartée sauf dans les cas où la sécurité était en jeu, par exemple dans les industries chimiques et pétrolières. Les entreprises lui préfèrent de plus en plus la maintenance conditionnelle. Il faut toutefois rappeler que ces deux types de maintenance sont complémentaires, certains travaux comme le nettoyage, la lubrification, le resserrage, etc. devant être effectués de façon systématique. [12]

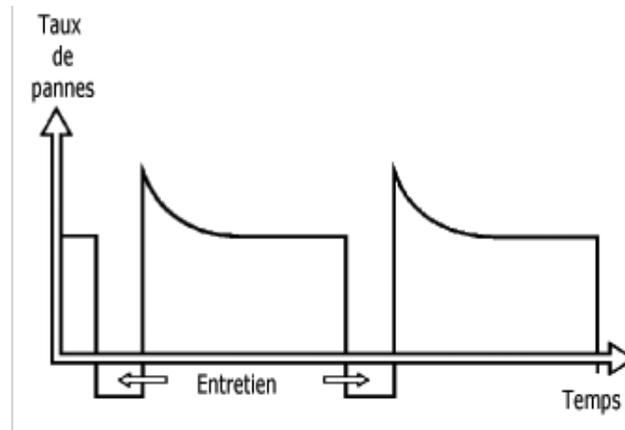


Figure 1.4: montre le principe de la maintenance préventive systématique. On remarque que le taux de défaillance a tendance à être plus élevé immédiatement après une réparation.

1.4.6-Maintenance préventive conditionnelle

L'électronique et l'informatique ont été des facteurs déterminants dans le développement de la maintenance préventive conditionnelle, cette dernière s'appuie sur des techniques de diagnostic non destructives qui fournissent de l'information sur l'état de dégradation d'une machine, pour cela nous faisons souvent recours aux analyses prédictives ou prévisionnelles permettant d'estimer la tendance évolutive du dysfonctionnement éventuel [13]. La maintenance préventive conditionnelle sert à optimiser la maintenance en « déclenchant les révisions au dernier moment et en limitant les travaux systématiques, donc les coûts. »

outre, si la maintenance préventive conditionnelle permet une réduction significative des coûts reliés à une maintenance corrective ou palliative, elle entraîne par ailleurs un investissement élevé en instrumentation de surveillance, d'analyse et des coûts de formation pour le personnel de maintenance qui en est responsable [14]. Ce type de maintenance est donc plus souvent réalisé par un service externe spécialisé ou par les fournisseurs qui possèdent les laboratoires et l'appareillage nécessaires à ces analyses et procédés de contrôle. [15]

1.4.7-Maintenance préventive prévisionnelle :

La maintenance prévisionnelle est définie, par la norme AFNOR - 2002, [16] comme la maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation de l'entité aux instants futurs. Elle peut prendre en compte un âge du matériel qui n'est pas forcément calendaire mais par exemple le temps de fonctionnement mesuré depuis la dernière inspection. Cependant, la maintenance systématique est coûteuse car l'usure des pièces dépend beaucoup des conditions de fonctionnement. Elle risque donc d'intervenir trop tôt ou trop tard [17]. La maintenance prévisionnelle est également appelée maintenance proactive [18] .

1.4.8-Maintenance proactive

La maintenance proactive est un terme pour désigner le renforcement des maintenances préventive et prédictive. Ainsi, dans cette forme de maintenance, la maintenance prédictive est utilisée pour repérer les causes des problèmes survenant sur les machines ou les processus. Cette modalité de maintenance fournit à l'expert un moyen pour créer une réduction efficace du temps total de pannes des équipements. En fait, dans ce type de maintenance, les équipements fonctionnent presque sans subir d'arrêt non planifié ; le temps moyen entre les défaillances MTBF (Mean Time Between Failures) des équipements est considérablement allongé. L'objectif majeur d'une maintenance proactive est l'analyse de l'évolution « surveillée » des paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et de planifier les interventions. [19], [20].

La surveillance de ces paramètres est réalisée dans le cadre d'une automatisation industrielle communicante intégrant les nouvelles technologies et concepts. Le développement des réseaux de communication associés permet d'accéder à un grand nombre de données temps réel existantes et donc d'en établir des paramètres de suivi [21], [22], [23]. Les systèmes de maintenance proactive reposent parfois sur la technologie M2M (Machine To Machine) et permettent notamment de mieux gérer les consommables.

1.4.9-Maintenance prédictive

La maintenance prédictive est intimement liée à la maintenance préventive conditionnelle. Elle couvre les mêmes types de travaux. Cependant, contrairement à la maintenance conditionnelle qui a recours à un capteur ou à la mesure de l'usure, la maintenance prédictive s'appuie sur l'évolution d'un symptôme, d'une dégradation. Par exemple, on tentera d'évaluer, selon le niveau des vibrations, le moment où le seuil critique sera atteint. Les travaux seront alors programmés dans le temps, ni trop tôt ni trop tard, de façon à éviter d'atteindre ce seuil critique.

1.5-Maintenance dans une approche fondée sur la fiabilité

Ce concept utilise des données de fiabilité pour améliorer la conception et l'entretien futur des processus. Ces stratégies d'entretien, plutôt que d'être appliquées indépendamment, sont intégrées pour tirer parti de leurs compétences respectives afin d'optimiser l'efficacité tout en minimisant les coûts du cycle de vie des processus (**Figure 1.5**).

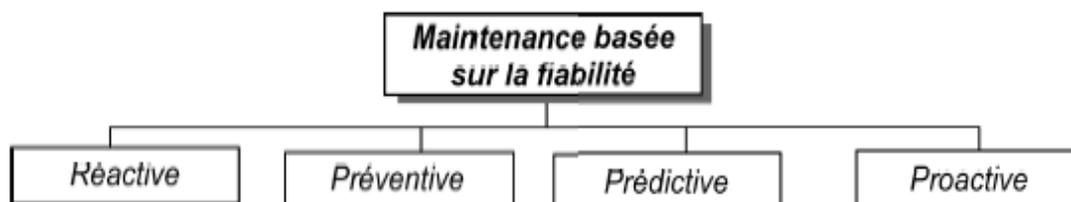


Figure 1.5 : Approche du concept MBF

Une approche efficace est proposée dans le cadre d'une activité de maintenance fondée sur la fiabilité [24]. L'analyse des politiques de maintenance dans l'industrie du transport aérien à la fin des années 60 et au début des années 70 a conduit au développement du concept MBF (maintenance basée sur la fiabilité).

Ce concept fait l'objet de directives [25]. En France, on peut retrouver cette démarche chez Electricité de France avec la mise en œuvre d'une démarche dite « *Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité (OMF)* » [26], [27].

Cette approche est un concept continu recueillant des données de performance sur les systèmes (Figure 1.6).

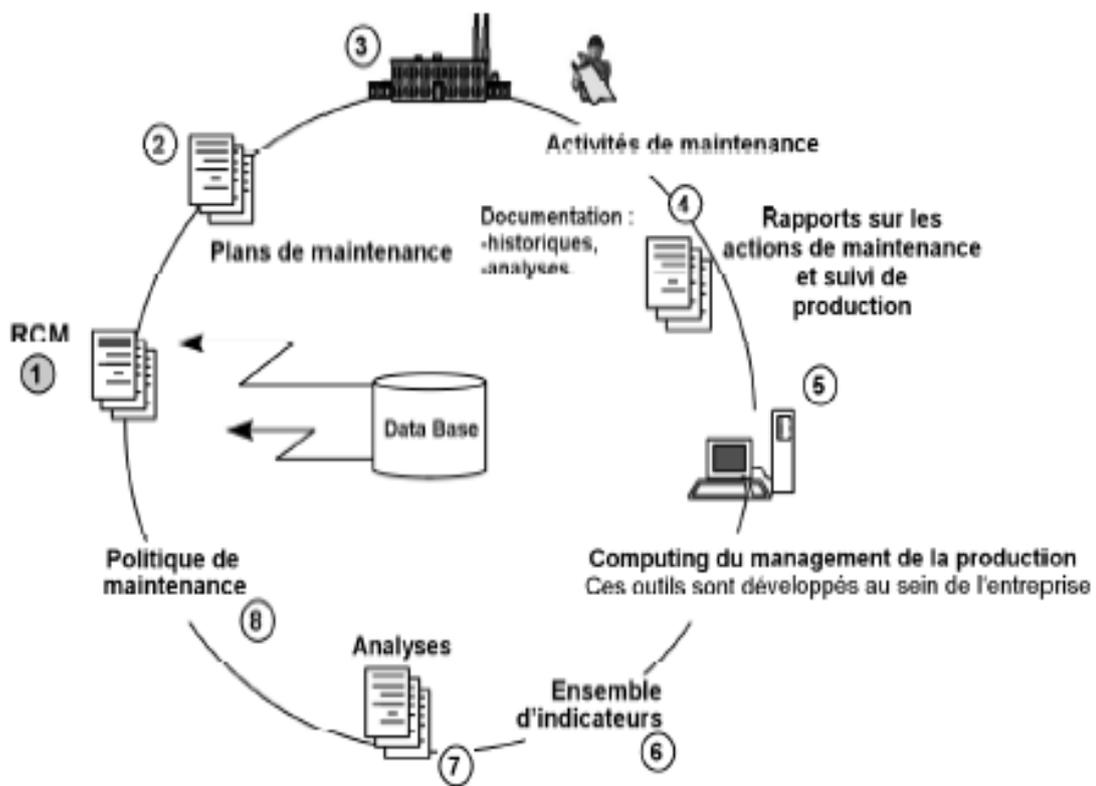


Figure 1.6: Mise en place d'une boucle d'amélioration et d'un retour d'expérience [28]

Tableau récapitulatif 1.1

Type de maintenance	corrective	Préventive conditionnelle	Préventive systématique	prédictive	proactive
Motif de l'action de maintenance	Panne ou arrêt intempestif	Révision programmée	Révision périodique à intervalle de temps	Inspection programmée	Processus d'aide à la décision portant sur des actions de maintenance pilotage du système ou modification des missions
condition d'intervention	Lors d'une défaillance	Intervention conditionnée Selon critère d'usure, à la condition état du bien	Suivant un échéancier	Avant l'apparition des défauts (date et action)	Avant l'apparition des défauts
Etat de l'équipement	arrêté	arrêté	arrêté	En fonctionnement	Arrêt programmé
Tache à réaliser	Changement, panne acceptable ou réparation de pièces	Révision ou changement de pièces, sans connaître l'état exact de la machine, risque de panne dangereuse	Réparation définie par le plan de maintenance graissage, petite pièce	Surveillance des paramètres	Identification de la cause première des défaillances et utilisation des fonctions de conseil de réglage et de diagnostic
objectif	Remise en service de la machine	garantir le fonctionnement d'une machine pendant une période déterminée	Reprise des taches de maintenance	Détecter les anomalies à temps et programmer leurs corrections	Allonger la durée de vie d'une machine avant la panne
coût	coûteuse en perte de production et en sécurité	coûteuse en matériels mais augmente la productivité par programmation des arrêts nécessaires	Coûteuse en matériels	coûteuse	coûteuse

1.6-Conclusion

La totalité des équipements d'une installation industrielle, ou d'un processus industriel, sont soumis à des mécanismes de dégradation ou bien à des facteurs influents dus aux conditions de fonctionnement et/ou d'environnement : usure, fatigue, vieillissement, altérations physico-chimiques diverses, conditions d'exploitation...

Aujourd'hui, devant cette situation, le responsable de maintenance avec ses équipes ne doit plus se contenter de surveiller et de réparer, il doit envisager des stratégies, implanter une politique de maintenance. La maintenance est avant tout un moyen de développement et d'adaptation technologique. On peut donc percevoir ce moyen comme un investissement dans la fiabilité et la disponibilité des équipements de production. « *Une nouvelle maintenance* » se développe aujourd'hui grâce aux différents travaux de recherche et aux technologies de diagnostic et de contrôle utilisant les réseaux de communication. Cette « nouvelle maintenance » utilise des techniques de prévision des pannes (par exemple : l'analyse des vibrations ou des huiles, ...). La littérature propose de nombreuses références.

Par analogie cette maintenance, dite « prédictive » ou « conditionnelle », peut être assimilée à une prophylaxie industrielle, puisqu'elle consiste en une prévention des anomalies ; alors que la gestion des pannes constatées correspond à un traitement curatif. Toutefois, cette prévention n'est pas systématique car le choix dépend de la rentabilité. Il est parfois judicieux économiquement d'attendre une panne et donc d'avoir recours à une maintenance curative si l'on maîtrise bien cette opération, alors qu'il peut s'avérer plus rentable dans d'autres cas de privilégier la prophylaxie.

Une prophylaxie désigne le processus actif ou passif ayant pour but de prévenir l'apparition ou la propagation d'une maladie.

Chapitre 2

La maintenance prédictive

2.1-Introduction

la maintenance s'est sans cesse améliorée à mesure que les procédés et équipements de production ont évolué, et c'est donc dans l'ordre naturel des choses qu'elle continue de le faire à l'avenir. Pour l'industrie du futur, l'objectif est de réduire les temps d'arrêt à leur plus simple expression, de tendre vers le « zéro ». Un but qui n'est pas irréalisable, car les progrès technologiques au service de la maintenance sont considérables, à condition notamment d'exploiter les données à bon escient et d'organiser la maintenance de manière optimale, car c'est la qualité de leur recueil, de leur analyse et de leur interprétation qui permettent de planifier les interventions et de faire en sorte que la production demeure la plus fluide possible, elles sont donc primordiales quant à la politique de maintenance d'une entreprise. Ces politiques de maintenance basées sur des interventions planifiées, ne réduisent cependant pas toujours les pannes des machines. Elles peuvent engendrer plus de main-d'œuvre, elles n'éliminent pas les pannes catastrophiques et causent des opérations d'entretien inutiles. Les méthodes expertes (maintenance conditionnelle) visent à surveiller la santé des machines sur la base de mesures d'indicateurs significatifs du comportement d'un mécanisme sans que son fonctionnement soit perturbé. La quasi-totalité des défaillances mécaniques peuvent être détectées grâce aux informations découlant d'indicateurs spécifiques [29].

Disposer d'une usine avec zéro panne est l'idéal de tout industriel. On peut l'atteindre, par la stratégie de maintenance privilégiée, dite prédictive. Allant plus loin que celles curative et même préventive, la maintenance prédictive repose sur une surveillance permanente des machines rendue possible par les nouvelles technologies : des capteurs d'analyse vibratoire permettant la collecte de données, l'image fiable des défauts générés, des instruments de mesure acoustique utilisant les ultrasons, capables de détecter les défauts mécaniques, électriques ou d'étanchéité, des capteurs relevant de la thermographie (surveillance des niveaux de température).

Aujourd'hui, le concept de diagnostic de machines comprend la détection automatique et la classification des défauts, alors que le pronostic est un concept de maintenance prédictive qui repose principalement sur l'estimation du temps de fonctionnement restant avant qu'une défaillance se produise sur une machine. La prédiction des défaillances promet de réduire considérablement les coûts.

pièces de rechange, etc.... Cependant, elle reste toujours un sujet de recherche relativement nouveau et constitue une préoccupation majeure des chercheurs dans le domaine de la maintenance.

Parmi les approches relatives à la maintenance prédictive rapportées dans la littérature, nous distinguons Pusey et Roemer [30] qui ont donné une vue d'ensemble du développement du diagnostic et du pronostic en technologies applicables à haute performance sur des turbomachines jusqu'à l'année 1999. Jardine et al. [31] a donné un aperçu et un catalogue de publications sur l'acquisition et le traitement des données, le diagnostic et le pronostic des différentes machines jusqu'à l'année 2005. O.Basile. [32] a développé une approche statistique pour établir une loi de fiabilité pour les équipements. Cette approche est basée sur le retour d'expérience (base des temps de défaillances fournis). Vachtsevanos et al. [33] ont défini et décrit le diagnostic des pannes par la méthode d'intelligence artificielle et les approches de la prédiction des défaillances par l'ingénierie des systèmes à travers des exemples.

2.2-Maintenance prédictive :

2.2-1-Définition

La maintenance prédictive est définie selon la norme NF EN 13306 X 60-319: les start-up et les entreprises spécialisées comme une «maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien »C'est une méthode proactive de maintenance, cela signifie que l'on peut anticiper et déceler la panne avant que celle-ci ne se produise, elle permet d'anticiper la panne d'une machine grâce à la surveillance continue et automatique de celle-ci. (En grande partie grâce aux données recueillies par des capteurs) et en analysant (en utilisant des outils de statistique et de probabilité mathématiques) de telles données pour déterminer la condition de santé et la nécessité probable d'une intervention de maintenance pour un composant particulier ou système. La maintenance prédictive permet ainsi d'éliminer les procédures inutiles que l'on peut retrouver dans la maintenance préventive.

2.3-Les trois phases pratiques de la maintenance prédictive

La maintenance prédictive a le pouvoir de détecter rapidement les anomalies, sans même démonter la machine, le pouvoir de prévenir la panne et en prévoir la réparation le plus tard possible (figure 2.1), en fonction des impératifs de production, ce pouvoir fait de cette dernière une technique efficace permettant une augmentation perceptible de la productivité.

En d'autres termes, l'intervention n'aura lieu que si nécessaire en établissant au préalable un diagnostic avant de programmer la réparation.

La pratique de la maintenance prédictive comporte 3 phases:

- La détection du défaut qui se développe → analyse du signal
- L'établissement d'un diagnostic →diagnostique machine
- La notion de fiabilité d'un système →courbe baignoire

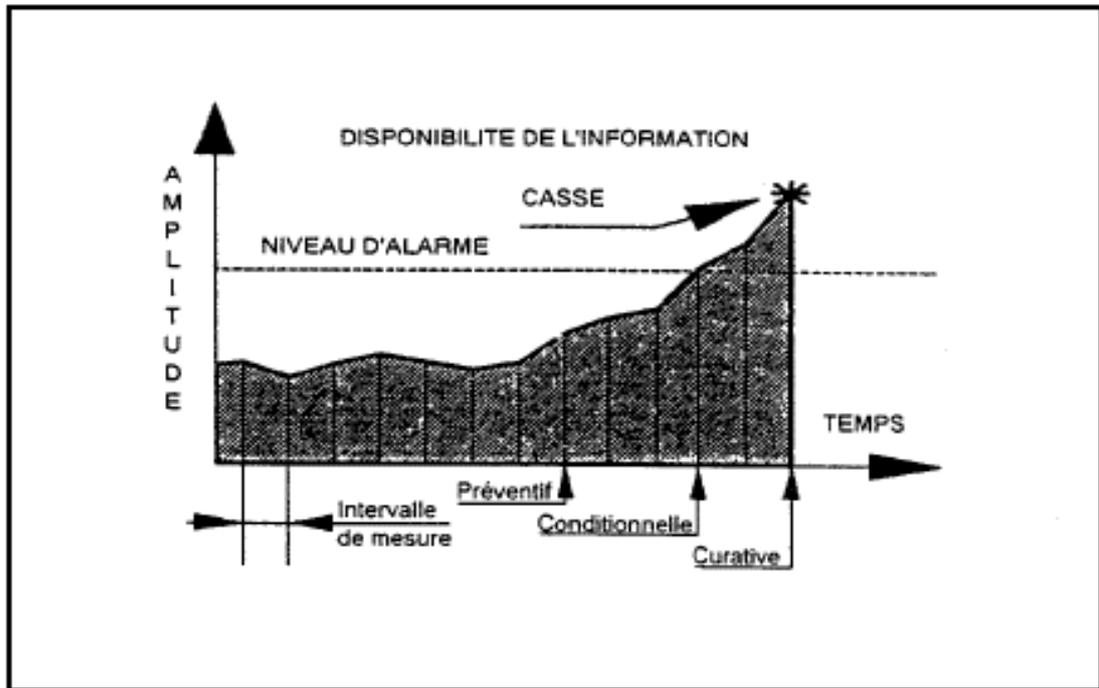


Figure 2.1 : Représentation graphique des amplitudes vibratoire ainsi que leur évolution dans le temps

2.3.1.- La détection du défaut qui se développe

A la mise en route de chaque équipement, les principales caractéristiques de base des appareils sont enregistrées notamment la signature vibratoire (paramètres intéressants dans le cas de machines tournantes) et de divers paramètres de fonctionnement (température, usure, performances...) Ces caractéristiques ou signatures, serviront de référence pour suivre, par comparaison, l'évolution d'éventuels défauts ultérieurs.

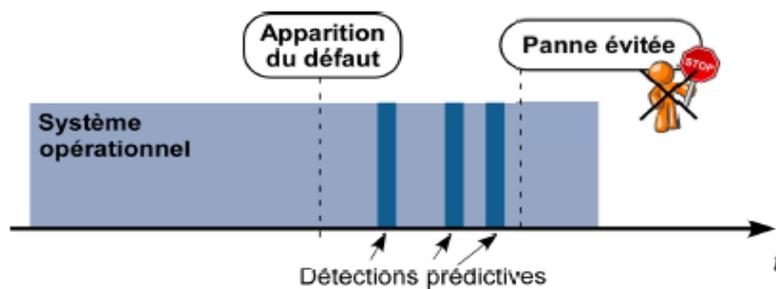


Figure 2.2 : Suivi de l'évolution du défaut par la surveillance prédictive [34]

2.3.2- L'établissement d'un diagnostic

Dès qu'une anomalie est détectée par les outils caractéristiques, au sens d'analyse paramètres, un diagnostic concernant l'origine et la gravité du défaut constatée sera établi.

2.3.3- La notion de fiabilité d'un système

La fiabilité d'un système s'exprime par la probabilité que ce dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisation et pour une période de temps déterminée [35]. La norme AFNOR [35] définit la défaillance comme une altération ou une cessation d'un bien à accomplir une fonction requise.

La durée de vie d'un système est une mesure de la quantité de service rendu, sa défaillance puisse survenir à n'importe quel moment, et Il est souvent difficile de caractériser cette dernière. Ce qui suit qu'un système est considéré défaillant ou hors d'usage s'il n'est pas en mesure de réaliser la fonction pour laquelle il a été conçu. La défaillance d'un équipement peut être caractérisée par un taux appelé taux de panne. Ce taux est aussi appelé taux de défaillance, taux de hasard ou taux de mortalité. Il représente également la vitesse d'arrivée de la panne [36]

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}$$

Avec :

$\lambda(t)$: taux de panne

$N(t)$: Nombre de composants ayant survécu jusqu'à l'instant t.

$N(t + \Delta t)$: Nombre de composants ayant survécu jusqu'à l'instant t + Δt .

Si nous représentons le taux de panne en fonction du temps, nous obtenons une courbe appelée « en baignoire » qui est divisée en 3 parties (figure 2.3) :

La première (1) est appelé période de mortalité infantile ou taux de panne ce taux de défaillance est élevé puis a tendance à décroître. Cela correspond à la période de rodage des systèmes mécaniques ou au « *déverminage* ».

La deuxième (2) partie n'est autre que la durée de vie utile : c'est la zone où le taux de panne est constant.

La dernière partie (3) est appelée le vieillissement ou l'usure : en atteignant cet âge, le composant commence à vieillir et le taux de défaillance augmente en fonction du temps, de façon significative cette évolution est connue sous le nom de « *courbe en baignoire* » comme le montre **la Figure 2.3**.

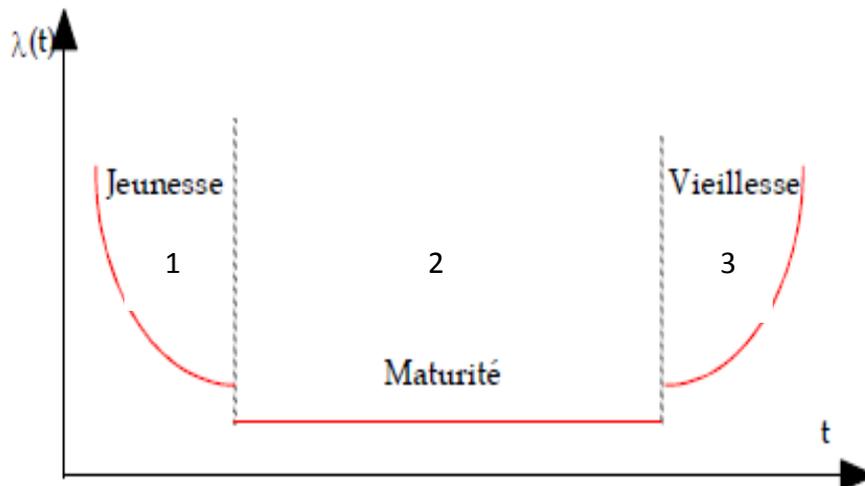


Figure 2.3: courbe en baignoire

Il importe de rappeler que la fiabilité est une fonction décroissante de l'usage fait de l'équipement. Elle est reliée au taux de panne $\lambda(t)$ par la relation suivante :

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(x) dx\right)$$

t : est la durée de la mission considérée.

2.4-Relation entre la maintenance et la fiabilité

La figure 2.4 présente la contribution des différents types de maintenance en ce qui concerne la fonction de fiabilité $R(t)$ et la durée de vie utile de l'équipement.

On va sans dire qu'une réduction du taux de panne $\lambda(t)$ entraîne une amélioration de la fonction de fiabilité $R(t)$. C'est dans cette optique que la maintenance améliorative (prédictive) a été instaurée. La maintenance préventive, avec toutes ses variantes, va en revanche tenter de ramener le taux de panne à son niveau le plus bas en remplaçant la composante usée sans améliorer les caractéristiques intrinsèques de l'équipement.

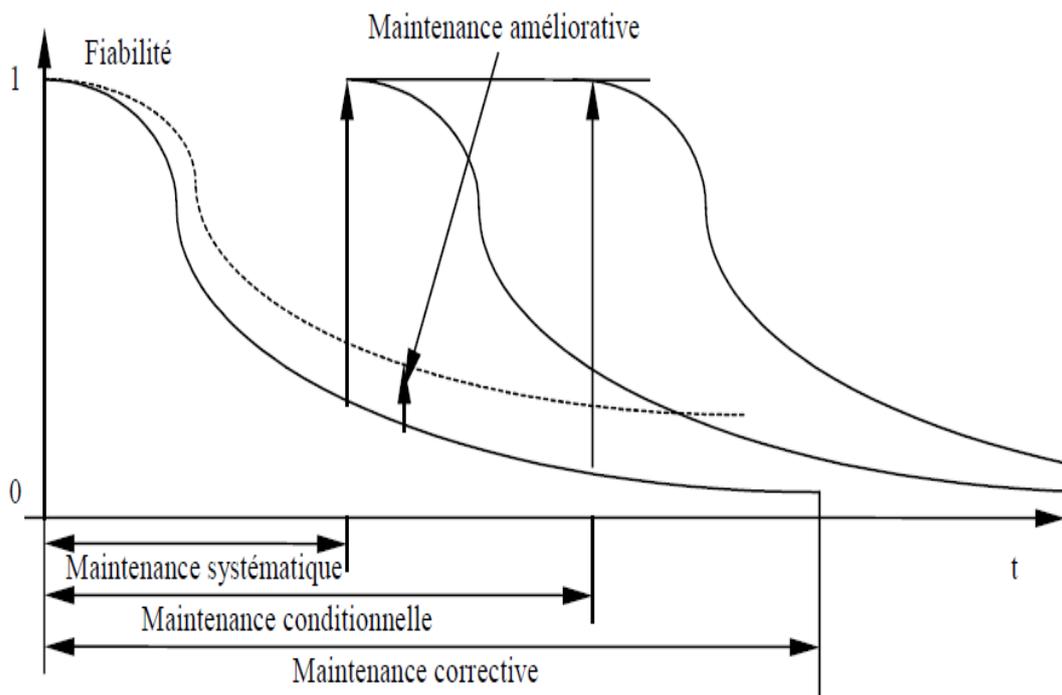


Figure 2.4: l'impact de la maintenance sur la fiabilité des équipements

2.5-Divers outils de la maintenance prédictive

a) La GMAO (gestion de la maintenance assistée par ordinateur), les logiciels de supervision et la commande numérique

b) L'IOT (L'Internet Industriel des Objets) qui apportent des solutions en faisant remonter les informations des capteurs vers des plateformes de type Cloud. Ils permettent également de simplifier la mise en place d'un réseau au sein duquel les moyens de production sont interconnectés et peuvent même communiquer entre eux.

c) Picomto (la solution de digitalisation d'instructions de travail) elle développe également un interrupteur connecté intelligent Check2 Start pour améliorer l'efficacité de votre parc machine.

d) Disposition d'un PC portable, tablette ou même Smartphone connecté à Internet, pour avoir des données précises sur la « santé » des équipements et sur leur rendement, mais aussi recevoir directement une alerte en cas de dysfonctionnement détecté. Le tout, en se trouvant loin du lieu de production et en ayant toute la latitude de régler un certain nombre de paramètres, comme les seuils d'alerte, par exemple. [37]

e) Les domaines de l'intelligence artificielle. Aujourd'hui, on n'est capable avec l'aide de capteurs de surveiller les différents composants d'une machine et grâce à une application informatique d'interpréter les données collectées et de prendre des décisions de manière automatique. Telle que, les capteurs pour mesurer :

- La température de l'équipement par imagerie infrarouge
- La viscosité du lubrifiant
- Les états de pression pour le flux de fluide et d'air
- La fréquence de vibration pour détecter la fragilité structurelle, le désalignement, les problèmes de roulement etc...

2.6-Avantages de la maintenance prédictive par rapport à la préventive

La maintenance préventive est une méthode de maintenance qui permet d'entretenir des équipements en effectuant des vérifications périodiques sur ceux-ci. Les stratégies de maintenance préventive comprennent :

- Les contrôles de routine
- Les mesures et ajustements
- Les changements d'huile et lubrification
- Les changements de pièces

Elle intervient pour l'identification et le changement systématique de composants endommagés. Elle doit déterminer le moment idéal pour effectuer cette opération. On ne peut pas savoir à l'avance quelle pièce va s'user. On est donc obligé d'effectuer des inspections périodiques, ces dernières vont nécessiter de la main d'œuvre, l'arrêt de la machine et présentation d'un certain coût. Il peut aussi arriver qu'on change une pièce par précaution alors que celle-ci fonctionne parfaitement bien. Des études ont montré que dans 30% des cas, la maintenance préventive se révèle inutile, et peut même provoquer des problèmes supplémentaires.

a) La maintenance prédictive permet :

- de diminuer le nombre d'interruptions des machines pour des opérations de maintenance.
- de diminuer le nombre de pannes.
- de mieux planifier les interventions.
- de mieux préparer les équipes d'intervention.
- de mieux échanger entre les professionnels de maintenance et les équipes de production.
- de mieux anticiper et gérer les besoins de pièces détachées des outils.

b) La maintenance prédictive

c'est passer d'une logique de flux poussé à une logique de flux tiré. Le fournisseur n'intervient que lorsque des signaux émis par une machine reflètent une panne probable à court terme. C'est donc l'état réel de l'actif, et non un calendrier théorique, qui déclenche une intervention. La maintenance prédictive permet d'anticiper les pannes

machines tout en minimisant les coûts des opérations de maintenance, le stock de pièces, le temps d'interruption des services, les heures supplémentaires et augmenter la durée de vie utile des machines, la productivité et les profits [38]

2.7-Avantages de la maintenance prédictive, au service de la productivité de l'entreprise.

La maintenance prédictive permet d'améliorer plusieurs indicateurs de performance :

- Amélioration du taux de rendement global (TRG) d'un équipement
- réduction des coûts de réparation et d'intervention
- amélioration et prédictibilité de la qualité du produit fini
- la maintenance prédictive permet d'améliorer le retour sur investissement. Elle rationalise le processus et permet des gains de coût et de temps
- Le placement des capteurs revient "10 fois moins chers" qu'une maintenance préventive classique.

—Inconvénients

- ▪ Complexe à mettre en place et coûteuse

2.8- Intérêt économique de la maintenance prédictive

Une installation en fonctionnement même dans des conditions normales entraîne un certain vieillissement du matériel, Pour une exploitation correcte, il est nécessaire de maintenir cette installation en bon état, de trouver le niveau optimum qui maintiendra cette dernière à niveau, sans mettre en danger la sécurité des personnes. Afin que le coût et les incidents diminuent figure 2.5 Dans le cas contraire, avec trop de maintenance préventive, le coût augmente. Le but de cette section est de présenter les principaux facteurs économiques qui justifient l'installation d'un système de détection de défauts sur les machines.

Premièrement, les gains escomptés de l'utilisation d'un système de surveillance sont exposés. Certains de ceux-ci sont difficilement estimables en valeur monétaire mais représentent un avantage certain pour l'entreprise qui les détient.

Deuxièmement, les différents coûts associés aux arrêts de production non planifiés sont présentés.

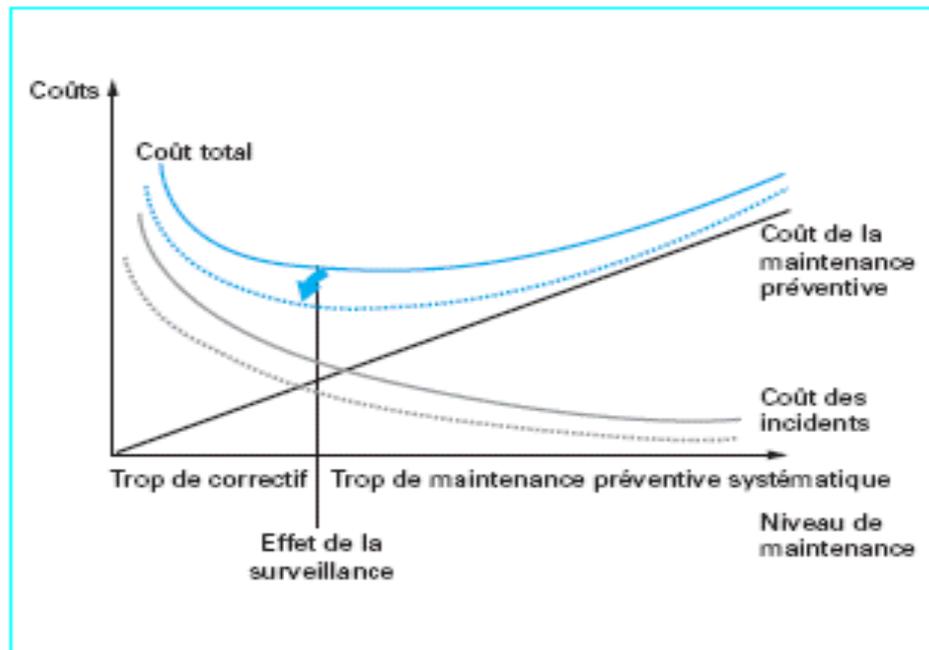


Figure 2.5 : optimisations de la politique de maintenance

2.9-Les services de la maintenance prédictive en technique de surveillance

Hormis le contrôle des vibrations, l'appellation maintenance prédictive concerne également plus particulièrement la surveillance d'équipements grâce à des techniques ne nécessitant ni arrêt de production, ni démontages tels que :

- L'analyse vibratoire

- Thermographie par infrarouge

- Le contrôle ultrasonique

- l'analyse des huiles

Toutes ces technologies sont non destructives et non intrusives.

Tableau 2.1 récapitulatif

	Principaux avantages	Principales limitations	Champs d'applications privilégiée
Analyse vibratoire	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Détection de défauts à un stade précoce, ▪ Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi, ▪ Autorise une surveillance continue, ▪ Permet de surveiller de l'équipement à distance (télémaintenance). 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Spectres parfois difficiles, ▪ Dans le cas de surveillance continue, installations relativement coûteuses. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 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, ▪ 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. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de lubrification, analyse des éléments d'usure, analyse de contamination par le processus (étanchéité) ... etc.
thermographie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation, ▪ Interprétation souvent immédiate des résultats. 	<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 (échauffement de surface), ▪ Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque de lubrification en particulier).
Analyse acoustique	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Permet de détecter de 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 répétitivité des mesures. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire

2.10-Conclusion

Dans ce domaine, les améliorations sont continuellement apportées pour faire en sorte que l'industrie du futur puisse véritablement réduire le temps d'arrêt de ses moyens de production. La maintenance bénéficie de l'intégration de technologies de pointe, comme les capteurs intelligents, la réalité virtuelle, la télédétection laser pour faire des relevés en 3D d'équipements difficiles d'accès, des capteurs à UV, d'autres à infrarouge ou encore des drones. Ces innovations sont associées aux progrès réalisés en termes de capacité de stockage, de transfert et de traitement d'informations, pour constituer des systèmes qui se veulent plus fiables et plus efficaces.

Si ces derniers apportent un avantage certain en ce qui concerne la maintenance corrective, ils sont, pour la plupart, davantage orientés vers l'amélioration de la maintenance prédictive. Ces systèmes sont étudiés pour aider les entreprises à ne plus subir les défaillances engendrant des arrêts, mais à les anticiper grâce à une interprétation efficiente des informations enregistrées par les capteurs. Ces derniers permettent d'alerter les techniciens lorsque les vibrations, les jeux mécaniques, la qualité des fluides (huiles) ou encore les niveaux de températures se rapprochent des seuils critiques, au-delà desquels la machine risque d'être défaillante. Aujourd'hui, l'entretien prédictif est plus facile à instaurer, plus facile à mettre en place avec les techniciens d'entretien et enfin, plus rentable pour nos machines critiques. Alimenté par des données fiables, alors que les machines fonctionnent au maximum de leur capacité, l'entretien prédictif détecte les pannes potentielles et nous précise ce qui risque de briser suffisamment tôt pour que des travaux soient bien préparés et exécutés efficacement avec les pièces commandées juste à temps. On peut dire que la maintenance prédictive, marquera sans doute le futur de la maintenance industrielle. A l'heure où les usines deviennent de plus en plus intelligentes, la maintenance prédictive jouera un rôle capital.

Chapitre3

Les techniques de la maintenance prédictive

3.1-Introduction

Pompes, turbines, moteurs, centrifugeuses, parc de machines tournantes parce qu'elles intègrent des organes en rotation, jouent un rôle souvent stratégique dans un procédé de fabrication. Pour les surveiller et prévenir les défaillances, on utilise le plus souvent des techniques d'analyse vibratoire, cette dernière, qui a fait ses preuves depuis de nombreuses années, permet de connaître l'état de santé d'un équipement, d'en suivre l'évolution et même de remonter à l'origine des défauts. On peut ainsi évaluer la gravité du problème et déterminer le moment optimal pour remplacer l'organe défectueux. Mais l'engouement qu'elles suscitent ne doit pas faire oublier qu'il existe d'autres outils permettant d'obtenir, simplement et à peu de frais, des résultats intéressants. C'est le cas en particulier de la détection ultrasonore. La méthode, basée sur la conversion en sons audibles des ultrasons émis par les machines, est très intuitive. Elle permet de détecter les défauts qui se manifestent à haute fréquence, et de "pointer du doigt" les équipements sur lesquels il sera nécessaire de réaliser une analyse vibratoire, de détecter tous les phénomènes qui induisent des ondes ultrasonores, de détecter tous les défauts qui sont susceptibles d'apparaître sur une machine tournante. Les défauts structurels, les problèmes de déséquilibre ou de balourd, entre autres, se situent souvent à trop basse fréquence pour être détectés.

La détection des ultrasons est avant tout une méthode de "dégrossissage". Si elle ne remplace pas l'analyse vibratoire, elle permet de réaliser un premier contrôle et de réserver les techniques de diagnostic les plus poussées aux seuls équipements qui nécessitent un complément d'analyse.

De même, le contrôle par ultrasons peut être utilisé en amont de la thermographie infrarouge pour détecter certains défauts avant qu'ils se manifestent par un échauffement. Entre ces différents outils, il est donc toujours préférable de faire jouer la complémentarité. La méthode ultrasonore n'est pas une solution universelle. Comme l'analyse vibratoire, la thermographie infrarouge ou l'analyse des huiles, elle souffre elle aussi d'un certain nombre de limites.

Malgré tout, si l'analyse vibratoire reste la méthode de surveillance "par excellence", il ne faut pas pour autant mettre de côté les autres techniques.

3.2-Définition de la thermographie infrarouge

La norme française A 09-400 définit la Thermographie Infrarouge comme « Technique permettant d'obtenir au moyen d'un appareillage approprié l'image thermique d'une scène thermique dans un domaine spectral de l'infrarouge ». C'est une méthode de référence pour le contrôle de nombreuses applications (installations électriques) [39], une méthode de contrôle non destructif qui permet une mesure globale et sans contact de la température d'objets présents dans la scène thermique analysée [40].

Pour ces applications en effet, le diagnostic peut directement être réalisé par l'opérateur à partir de l'image thermique obtenue sur la caméra.

La camera infrarouge capte au travers d'un milieu transmetteur les rayonnements émis par une scène thermique. Le système radiométrique convertit la puissance de rayonnement en signaux numériques ou analogiques : ceux-ci sont transcrits en température par le calculateur et transformés en points lumineux sur un écran.

La thermographie infrarouge est utilisée dans le domaine de la surveillance conditionnelle de fonctionnement pour optimiser les tâches de maintenance sans interrompre le flux de production, et réduire au maximum les coûts d'entretien.



Figure 3.1 : Contrôle de défaut de calorifuge par thermographie sur un équipement sous pression

3.2. a- Les différents moyens de mise en œuvre de la thermographie infrarouge stimulée

La mise en œuvre de la thermographie infrarouge stimulée est donc basée sur l'excitation de la pièce à contrôler par une source de chaleur extérieure. Le choix du matériel de détection dépend de la taille de la surface à inspecter, de sa nature ainsi que de l'environnement extérieur. Ainsi, en fonction de la source d'excitation choisie, on associera un système de détection localisé (détecteur infrarouge mono élément) dans le cas d'une excitation ponctuelle ou un système de détection étendu (caméra de thermographie infrarouge) dans le cas d'une excitation globale.

3.3-Traitement des données

La mise en évidence des défauts sur les séquences d'images enregistrées nécessite alors l'utilisation d'algorithmes de traitement spécifiques [41] en fonction de la source d'excitation utilisée (par lampes halogènes, par lampes flashes, par ultrasons et par induction) et des propriétés (thermique, dureté, ...) ou du défaut recherché.

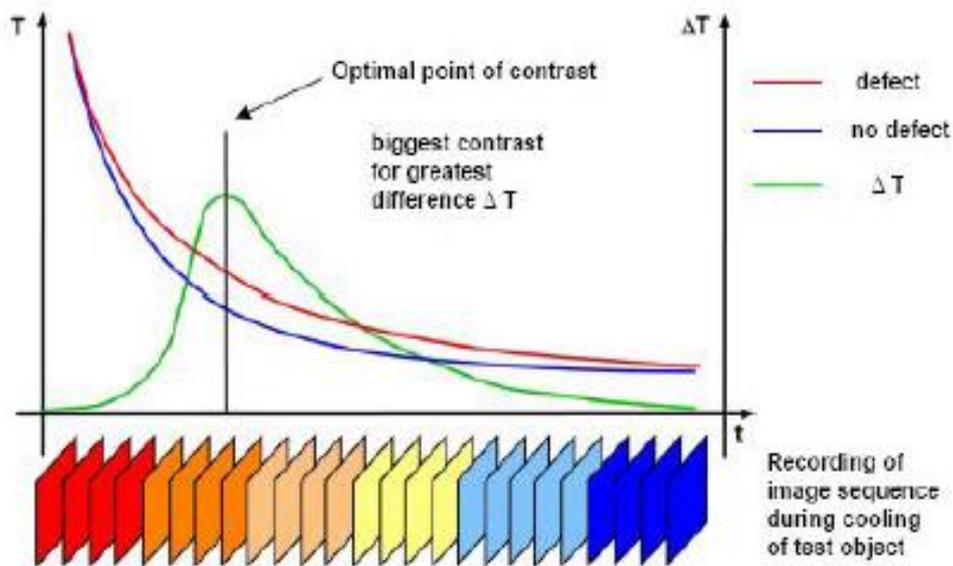


Figure 3.2 : Traitement des données basé sur la recherche du maximum de contraste entre une zone saine et une zone endommagée (Thermal Wave Imaging) [42]

3.4-Exemples d'applications sur matériaux métalliques

3.4.1-Application au contrôle de revêtement

dans l'industrie mécanique, il est généralement difficile de mesurer l'épaisseur de revêtement déposé sur le composant ou de contrôler la bonne adhésion du revêtement sur le substrat. On propose ici deux exemples d'applications de la thermographie active pour du control de revêtement. [42]

3.4.2- Mesure d'épaisseur de revêtement

L'application présentée ici permet de mesurer une épaisseur de revêtement de l'ordre de 120 μm et de détecter une variation d'environ 20 μm de cette épaisseur.

- mesure d'épaisseur d'un revêtement céramique sur une pièce métallique de dimensions 50 mm x 100 mm. Les images ont été initialement calibrées sur un échantillon de référence poli et les diagrammes de phase peuvent ensuite être directement tracés en épaisseur figure 3.3. a.

- Représentation de l'évolution de l'épaisseur de revêtement le long de la ligne rouge. Figure 3.3.b.

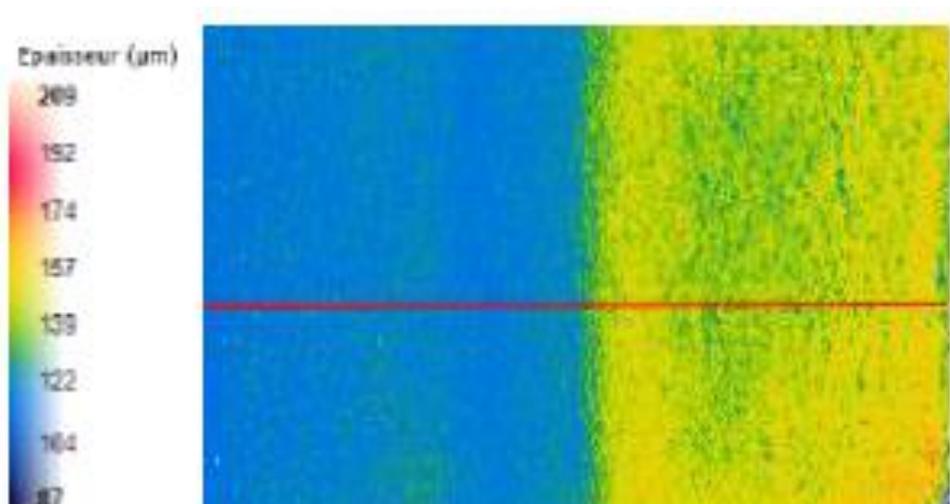


Figure 3.3. a. : image de phase [42]

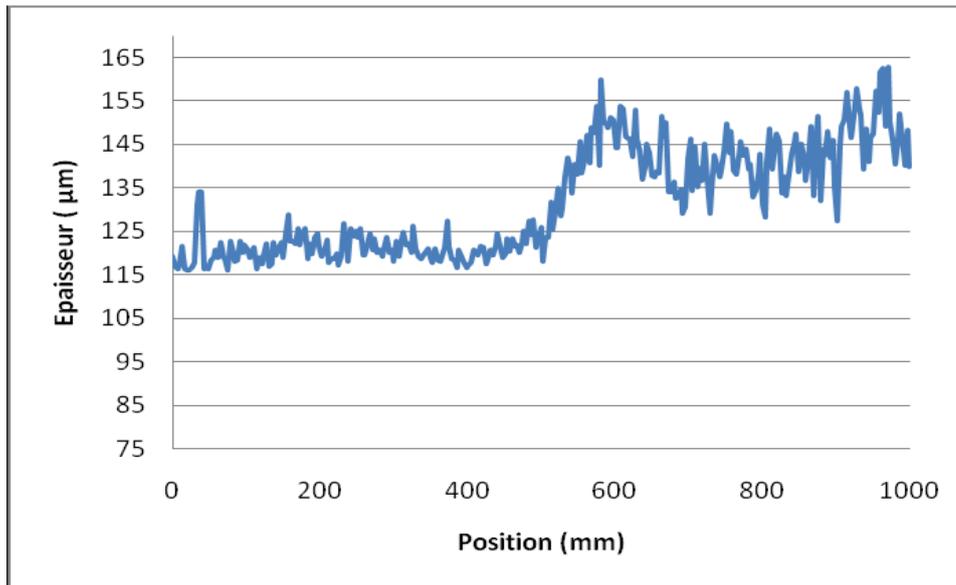


Figure 3.3.b : Profil vertical le long de la ligne rouge [42]

Figure 3.3: Mesure d'épaisseur de revêtement céramique sur pièce métallique par thermographie active avec excitation par laser (edevis)

3.4.3- Mise en évidence d'un décollement de revêtement

Le décollement du revêtement engendre la création d'une lame d'air entre ce revêtement et le substrat. Si l'on chauffe une pièce dont le revêtement est décollé, cette lame d'air joue le rôle de barrière thermique et une analyse grâce à une caméra thermique montre une élévation de température plus importante au niveau de la zone décollée.

- Image thermique avant excitation d'une pièce présentant un écaillage partiel sur la partie gauche de l'image tandis que le revêtement est encore présent sur la partie droite. On cherche ici à voir si la zone décollée du revêtement s'étend au-delà de la zone écaillée. **Figure 3.4. (a).**
- 1 seconde après l'échauffement par une lampe flash, nous obtenons le thermo gramme sur lequel on peut observer une zone colorée qui correspond à une zone où le revêtement est décollé. Figure 3.4. (b).

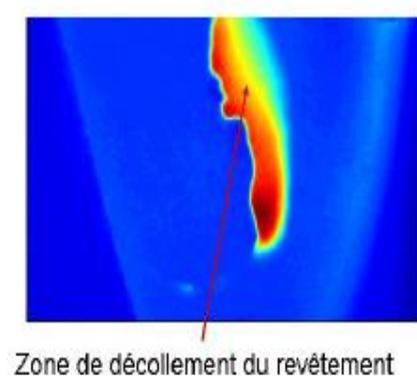
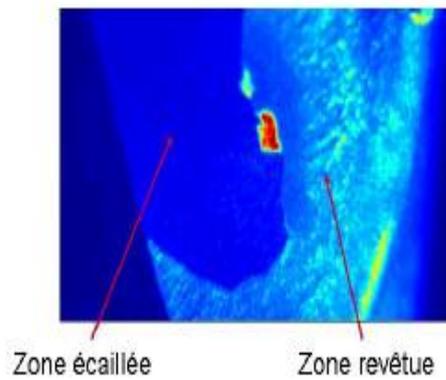


Figure 3.4. (a) : Image avant excitation

Figure 3.4. (b): Image 1s après l'excitation

Figure 3.4 : Contrôle par thermographie infrarouge active d'un décollement de revêtement céramique sur un substrat en fonte GS [42]

3.5- Domaines d'application .

- Photographie aérienne de vues panoramiques par temps couvert (IR traverse facilement l'atmosphère, même brumeuse). .
- Chauffage domestique ou industriel .
- Séchage des vernis, peintures, bois, cuirs, papiers, pellicules photographiques .
- Déshydratation des fruits et légumes .
- Applications militaires importantes : autoguidage par IR des missiles, appareils de visée nocturne .
- En thérapie, activation par IR des processus cellulaires, en particulier la cicatrisation .

3.6-Avantage des sources thermiques : .

- Emission de radiations dans une grande plage de λ .
- Intensité forte Réduction des problèmes d'amplification du signal .
- Stables pendant de longues périodes .

3.7- Définition du contrôle ultrasonore

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques de la matière à des fréquences inaudibles pour l'oreille humaine ($>20\ 000$ Hz). La plage de fréquences type utilisé par les systèmes à ultrasons de maintenance préventive est généralement de l'ordre de 30-40 kHz.

Le contrôle ultrasonore utilisé en maintenance préventive consiste à écouter, avec un appareil appelé contrôleur ou détecteur ultrasonore, les ultrasons émis par les machines en fonctionnement. L'appareil de contrôle détecte les ondes ultrasonores de fréquence supérieure à 20 kHz, et ils les convertissent en sons audibles (de 50 Hz à quelques kHz).

Le bruit que l'on entend révèle alors la présence d'éventuels dysfonctionnements. Le défaut est d'autant plus fort que l'on se rapproche de la source.



Figure 3.5 : Contrôle d'un groupe motopompe par ultrasons

Dans le domaine des machines tournantes, la méthode permet de détecter les ultrasons induits par le frottement de pièces mécaniques (au niveau des roulements, des engrenages, des paliers, etc.). Elle détecte tous types de défauts, pourvu qu'ils se manifestent à haute fréquence. C'est le cas par exemple des défauts spécifiques aux roulements (usure, roulement défectueux, mauvais graissage, etc.).

La technique offre de multiples applications dans le contrôle d'équipements hydrauliques et pneumatiques (détection de fuites, contrôle d'étanchéité) et permet aussi de détecter les ultrasons émis par des défauts d'origine électrique (mauvais contacts, effets corona, effets d'arc, etc.).

3.8-Appareillage utilise

—L'appareil ultrasonore détecte les ondes ultrasonores et son circuit électronique les transforme en fréquences audibles qui seront restituées dans un casque d'écoute.



Figure 3.6: Exemples de Contrôleur avec casque d'écoute

—Des capteurs flexibles sont spécialement adaptés à détecter des signaux ultrasonores dans des zones difficiles d'accès. Le cône d'extension de sensibilité fonctionne comme un amplificateur de signaux ultrasonores.

—Le capteur parabolique est un puissant amplificateur de signaux ultrasonores.

— Le capteur à aiguille est une sonde de contact indispensable dans toutes les applications mécaniques.



Figure 3.7: Exemples de capteurs utilisés en contrôle ultrasonore

3.9- Applications du contrôle ultrasonore

3.9.1- Control de vibration acoustique

Le monitoring de vibration qui nous renseigne sur les intervalles de lubrification et prédire les pannes mécaniques.

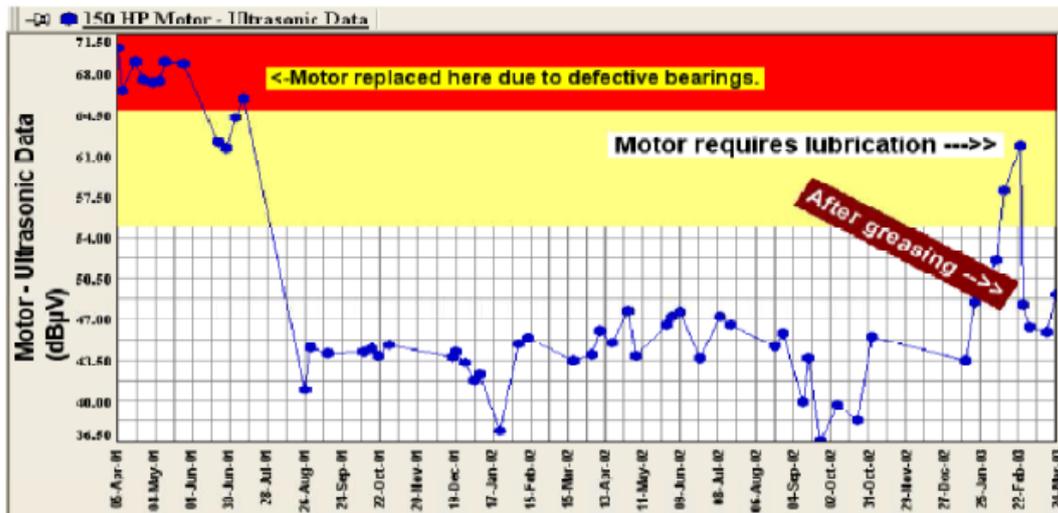


Figure 3.8: Contrôle ultrasonique d'un moteur

3.9.2- Inspections électriques

Le contrôle ultrasonore permet de détecter les ultrasons émis par des défauts d'origine électrique (mauvais contacts, effets corona, effets d'arc, etc.)

L'effet corona, aussi appelé effet couronne est une décharge électrique entraînée par l'ionisation de l'air séparant deux électrodes portées a un haut potentiel lorsque celui-ci dépasse une valeur critique.



Figure 3.9:Exemple de détérioration d'un isolateur de ligne par l'effet corona

3.10- Limites du contrôle ultrasonore

Malgré tout, la méthode ultrasonore n'est pas une solution universelle. Comme l'analyse vibratoire, la thermographie infrarouge ou l'analyse des huiles, elle souffre elle aussi d'un certain nombre de limites. Un détecteur à ultrasons ne permet pas, de détecter tous les défauts qui sont susceptibles d'apparaître sur une machine tournante, telle que les défauts structurels, les problèmes de déséquilibre ou de balourd, entre autres, se situent souvent à trop basse fréquence pour être détectés. D'autre part, elle nécessite d'être expert en traitement du signal, surtout pour la détection à distance.

Contrairement à l'analyse vibratoire, le contrôle ultrasonore ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi. Avec un détecteur à ultrasons, il est possible, de détecter le bruit de le comparer à ce que l'on obtient habituellement et d'en déduire qu'il y a une anomalie. Mais impossible (à moins d'être expert) de déterminer s'il s'agit d'un mauvais graissage, d'un problème d'équilibrage ou d'alignement. De même, on pourra constater une augmentation significative du niveau de bruit émis par un roulement, mais seule l'analyse vibratoire permettra de localiser précisément le défaut (bague interne ou externe, bille, etc.)...

Le contrôle ultrasonore permet de détecter un certain nombre de dysfonctionnements à un stade plus précoce que les techniques traditionnelles. C'est le cas notamment dans la détection des défauts de roulements, qui commencent à se manifester à haute fréquence, se déplacent en effet à une fréquence de plus en plus faible (avec une énergie croissante) au fur et à mesure de leur dégradation. Lorsque la dégradation se manifeste à basse fréquence, il est donc parfois trop tard.

Le contrôle par ultrasons peut être utilisé en amont de la thermographie infrarouge pour détecter certains défauts avant qu'ils se manifestent par un échauffement. Entre ces différents outils, il est donc toujours préférable de faire jouer la complémentarité.

3.11-Exemple d'un suivi de contrôle d'épaisseur d'une citerne :

En principe le contrôle d'épaisseur des citernes se fait d'une manière systématique, selon les produits plus au moins agressifs qu'elle contiennent. la périodicité de contrôle est semestrielle ou annuelle.

Les mesures sont prises toujours aux mêmes endroits. Les points de mesure sont dispersés sur une ligne hélicoïdale autour de la citerne figure 3.10.

Désignation : RELEVÉ D'ÉPAISSEUR DE LA CUVE ACIDE S3 2163 D'ATELIER ATTAQUE		DATES					
POINTS DE MESURE	ÉPAISSEUR D'ORIGINE						
		S1	8 mm				
S2	8 mm						
L1	7 mm						
L2	7 mm						
L3	7 mm						
L4	7 mm						
F1	8 mm						
F2	8 mm						
F3	8 mm						
F4	8 mm						

Matière : E24 2
Surépaisseur de corrosion : 4 mm

Figure 3.10 : Instruction technique mécanique de la cuve acide [43]

3.12- Rôles des huiles industrielles:**3.12.1- Lubrification :**

Théoriquement une pièce correctement lubrifiée, fonctionnant dans des conditions idéale durera indéfiniment. En réalité ce n'est pas le cas, mais une pièce bien lubrifiée a le plus de chance d'atteindre sa durée de service maximale.

En effet le lubrifiant forme un film entre les pièces en mouvement. Il adhère fortement aux surfaces qui doivent être séparées. Lorsque les pièces se déplacent l'une par rapport à l'autre, le film est soumis à des contraintes internes de cisaillement. Il en résulte un glissement entre les différentes couches du film avec frottement.

L'épaisseur du film lubrifiant est déterminée principalement par la vitesse des pièces à lubrifier, la température de fonctionnement et les caractéristiques du lubrifiant. On peut distinguer trois états importants en lubrification. [43].

3.13-Les différents types d'huiles**- Les huiles minérales.**

Les huiles minérales proviennent de la distillation du pétrole brut (raffinage). D'un prix peu élevé, elles présentent des performances "moyennes" Les huiles minérales sont les plus utilisées aussi bien dans les applications automobiles qu'industrielles.

- Les huiles de semi synthèse

Les huiles de semi synthèse s'obtiennent à partir d'un mélange d'huiles minérales et d'huiles de synthèse (généralement 70 à 80% d'huile minérale et 20 à 30% d'huile de synthèse).

- Les huiles de synthèse

- Les diesters

- Les polyalphaoléfines (PAO)

- Les polyglycols

3.14 - Les caractéristiques des huiles industrielles

Les huiles sont des produits chimiques complexes travaillant dans des conditions excessivement variées sur lesquels on est amené à rechercher, à mesurer, de nombreuses caractéristiques : Caractéristiques physico-chimiques de laboratoire, d'identification. caractéristiques d'utilisation, de performance. [43]

-L'inflammabilité

Les hydrocarbures chauffés émettent des vapeurs qui, mélangées à l'air, donnent un mélange explosif.

- **L'indice d'acide** : permet de déterminer .
- Si une huile mal raffinée conserve des traces d'acide minéral .
- Si dans une huile usée l'oxydation a formé des acides organiques .
- **La viscosité** : La viscosité est la force qui s'oppose au glissement des différentes couches composant le film lubrifiant .
- **L'indice de viscosité** : L'indice de viscosité donne la relation entre la viscosité et la température.

3.14.1- Les analyses des huiles industrielles .

Deux paramètres importants conditionnent la lubrification correcte des machines tournantes : l'état du lubrifiant et l'état des surfaces lubrifiées. Les analyses d'échantillons du fluide permettent de déterminer d'une part les caractéristiques physico-chimiques du lubrifiant et d'identifier une usure des éléments mécaniques .

Deux facteurs prépondérants interviennent pour modifier les caractéristiques d'un lubrifiant

- La dégradation ,
- La contamination .

La dégradation d'un lubrifiant se produit en général sous les actions combinées de l'oxygène de l'air et des températures élevées. Cette oxydation entraîne une dégradation des qualités du lubrifiant et parfois un dépôt capable de gêner le fonctionnement normal des machines. Le suivi des propriétés du lubrifiant est utile, principalement pour ajuster les périodes de changement ou d'appoint, sans permettre la prédiction d'usure des pièces mécaniques. La contamination du lubrifiant provient de particules d'usure des pièces internes, mais aussi de l'eau et des particules solides en provenance de l'extérieur du système lubrifié .

Ces particules solides ou ces fluides étrangers sont souvent à l'origine d'usures anormales.

3.15.1- Préparation d'un échantillon

Pour préparer un échantillon d'huile en vue d'une analyse, il faut commencer tout d'abord par extraire un échantillon représentatif du réservoir contenant l'huile à analyser. Ensuite il faut filtrer cet échantillon en utilisant une des techniques de séparation entre phases. Cependant, la prise de l'échantillon doit être faite de façon aussi soignée que possible.

3.15.1. a-Echantillonnage

Il existe deux conditions primordiales pour obtenir un échantillon de lubrifiant représentatif:

- 1) L'échantillon doit être extrait d'un volume de lubrifiant la machine en mouvement.
- 2) L'échantillon doit être extrait "à chaud", c'est-à-dire que la machine aura été en opération depuis au moins une heure lors de l'échantillonnage

Pour un système à lubrification sous pression, il est facile d'obtenir un échantillon représentatif. Il s'agit simplement d'installer une soupape d'échantillonnage à un point en amont du filtre et de s'assurer que la soupape et le raccord en "T" soient bien drainés avant chaque prise d'échantillon. [44]

3.15.2- Techniques de séparation

3.15.2. a- Décantation

La décantation est un procédé permettant de séparer : une phase solide de matières en suspension dans un liquide ou deux phases liquides non miscibles de densités différentes. Dans les deux cas, l'action consiste à laisser reposer les phases en contact et à attendre un temps suffisant pour qu'elles se séparent sous l'action de la pesanteur. C'est une opération simple mais longue, ne nécessitant que peu de matériel, donc peu coûteuse, mais peu sélective. Elle ne met en jeu qu'une force extérieure constante, la pesanteur, et ne nécessite que d'éviter toute agitation ou toute action de mélange, une fois que la séparation est faite.

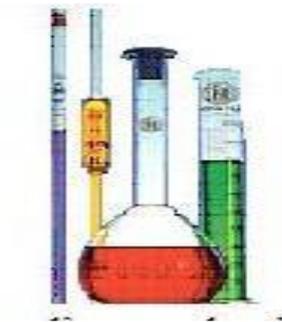


Figure 3.11: Exemples d'ampoules à décanter [44]

3.15.2.b-Filtration

La filtration est un procédé permettant de séparer une phase continue (liquide ou gazeuse) et une phase dispersée (solide ou liquide) initialement mélangées.

La séparation se fait en faisant passer le mélange à travers un milieu filtrant, milieu poreux adapté aux caractéristiques de la suspension à filtrer, sous l'action d'une force de pression fournissant à la suspension l'énergie nécessaire qui lui permet de traverser le milieu poreux. Le milieu filtrant est constitué par des particules solides, elles mêmes déposées sur un support qui peut être, selon les cas, des feuilles de papier spécial, des tissus, des toiles métalliques, du sable, des gravières. Pour faciliter l'opération et augmenter la vitesse de passage du liquide, qui dépend de la perte de charge dans les canaux du milieu filtrant, on exerce une aspiration sur le filtre, ou on augmente la pression sur le liquide à filtrer [44]

3.16- Les analyses de dégradation des lubrifiants :

Les analyses de dégradation s'intéressent aux propriétés des caractéristiques physico-chimiques et moléculaires du lubrifiant.

Les principales caractéristiques physico-chimiques d'un lubrifiant concernent :

- La mesure de viscosité à 40°C.
- La mesure de viscosité à 100°C.
- L'indice de viscosité.
- Le point d'éclair.
- L'indice d'acidité ou d'alcalinité.

3.16.1- Mesure de la viscosité dynamique :

3.16.1. a- Viscosimètre à bille :

Ce viscosimètre permet de déterminer la viscosité dynamique en mesurant le temps de chute d'une bille de masse volumique ρ_b donnée dans un volume de fluide de masse volumique ρ pour une hauteur de chute déterminée. L'équilibre relatif de la sphère (poids, poussée hydrostatique, force de viscosité) donne la relation suivante :

$$\mu = k \times (\rho_b - \rho) \times t$$

k est une constante qui caractérise le dispositif, elle est déterminée lors de l'étalonnage du viscosimètre avec une huile étalon.

Le temps mis par la bille pour franchir la distance mesurée entre deux niveaux est transmis vers un enregistreur.

Figure 3.12: Viscosimètre à bille [44]

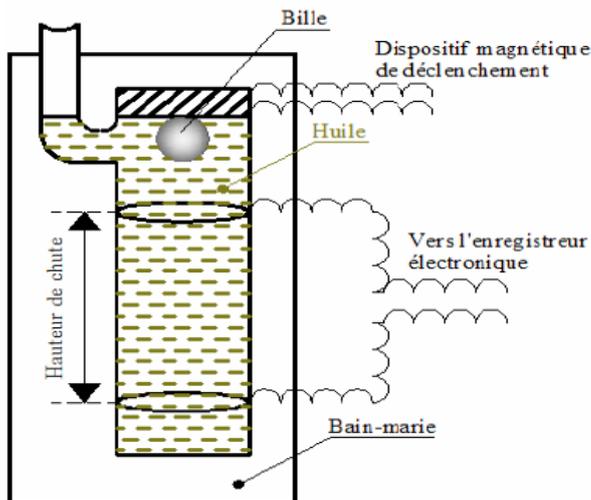


Figure 3.13 : Principe de fonctionnement [44]

3.16.1. b- Etalonnage du viscosimètre à bille

L'étalonnage du viscosimètre à bille s'effectue en mesurant le temps de chute de la bille dans une huile de viscosité dynamique η connue. Ainsi en utilisant la formule précédente on peut déterminer la constante k caractérisant le viscosimètre.

3.17-Contamination des lubrifiants :

Plusieurs méthodes, faisant appel à des équipements de complexité très variables, peuvent être utilisées pour étudier, de manière qualitative ou quantitative l'importance et la nature de la contamination. On distingue plusieurs techniques qui se classent dans trois grandes familles de mesure de contamination :

- La contamination globale.
- La contamination par l'eau.
- La contamination par les particules métalliques.

3.17.1- La mesure de pollution gravimétrique :

La méthode consiste à filtrer sous vide un volume de lubrifiant à l'aide de deux membranes filtrantes superposées de même porosité nominale de $0,8\mu\text{m}$ et de 47 mm de diamètre. Après pesée de chaque membrane, on peut ainsi déterminer la teneur en impuretés solides, exprimée en mg/100ml d'échantillon.

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite une grande précision dans son utilisation, ce qui constitue un obstacle dans le cadre d'une surveillance continue. Néanmoins, cette technique offre un moyen simple d'évaluation du niveau de contamination.



Figure 3.14: Pompe à vide



Figure 3.15: Appareillage pour le contrôle de la pollution

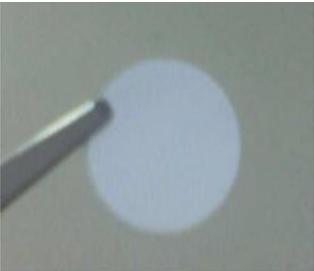


Figure 3.16: Membrane filtrante [44]

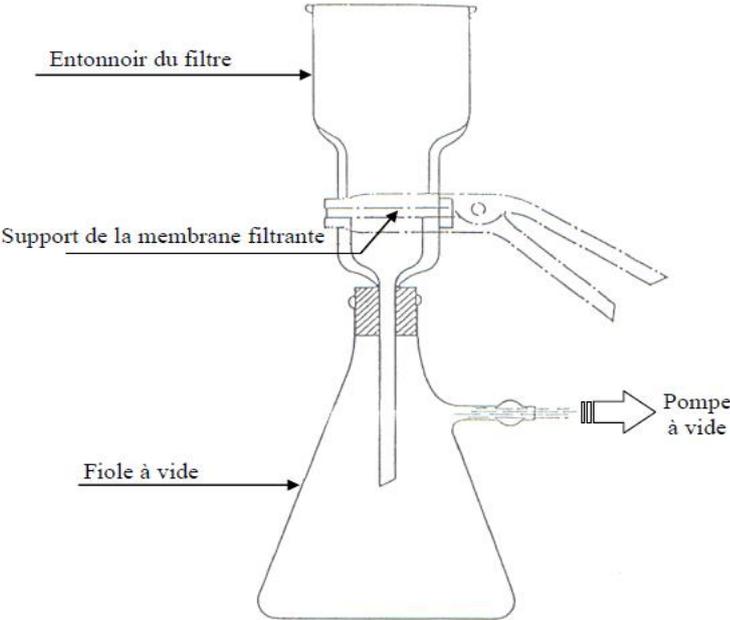
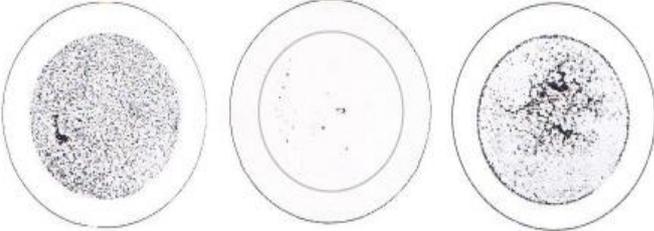


Figure 3.17: Composition de l'appareillage de contrôle de la pollution gravimétrique [44]

Tableau 3.1: Exemples des résultats des analyses sur des membranes filtrantes [44]

<p>Exemple de contamination par l'eau</p>	
<p>Exemple de contamination par de grosses particules</p>	

3.18-L'Analyse vibratoire

3.19-Principes de l'analyse vibratoire

3.19.1-Vibration et force interne

Les vibrations d'une machine sont considérées comme une manifestation extérieure des forces internes, l'analyse de leurs signaux nous informe sur les processus de dégradation interne

Il ya deux niveaux d'investigation

—La mesure du niveau global qui permet de qualifier l'état général par comparaison à des normes ou à des mesures précédentes

—L'analyse spectrale qui permet de diagnostiquer l'origine des défauts et de suivre l'évolution en fonction du temps

3.19.2-Grandeurs physiques caractérisant une vibration

Les grandeurs associées à l'amplitude d'une vibration d'un système mécanique simple qui est constitué d'une masselotte «M» suspendue à un ressort sont [45]

• **Le déplacement** est la variation de la position de masselotte d'une part et d'autre du point d'équilibre de la limite supérieure à la limite inférieure du mouvement. Phénomène à basses fréquences dont la gamme d'analyse va de 0 à 200 Hz. (balourd et fouettement...)

• **Vitesse** sera nulle au point (haut et bas) du mouvement de la masselotte et sera maximale dans le point d'équilibre. Phénomène à moyennes fréquences dont la gamme d'analyse va de 0 à 1000 Hz. (balourd, alignement, choc, aubages...)

• **L'accélération** permet de passer la masselotte de la vitesse minimale vers la vitesse maximale. Phénomène de hautes fréquences dont la gamme d'analyse va de 0 à 10000 Hz. (roulements, engrènement, turbulence...)

On déduit que la vibration de système

masse-ressort est caractérisée par trois grandeurs:

• le déplacement

• la

vitesse

• l'accélération

La mesure de niveaux globaux de ces trois paramètres permet d'apprécier l'état de la machine

- L'évolution significative d'une dégradation
- La comparaison à des seuils

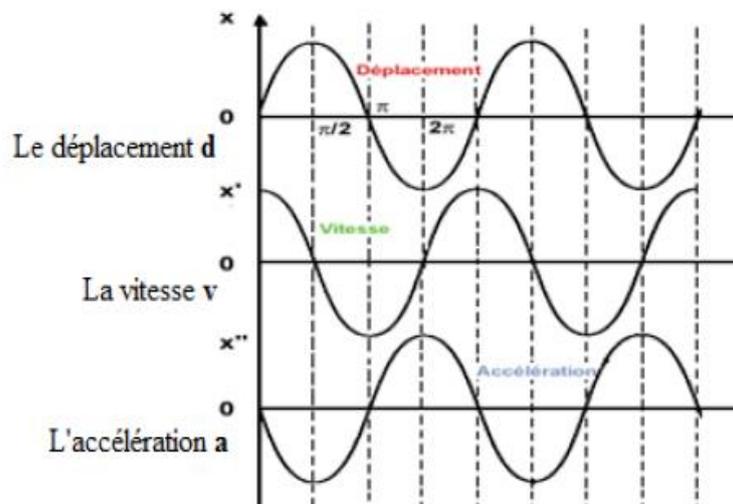


Figure 3.18 : Grandeurs associées à l'amplitude d'une vibration [45].

La figure ci-dessus montre le décalage entre les maximums de chaque sinusoïde. Ce décalage est appelé une phase du signal.

- La représentation en accélération accentue les hautes fréquences ;
- La représentation en déplacement accentue les basses fréquences ;
- La représentation en vitesse n'accroît pas les basses et les hautes fréquences [46].

Il existe des relations mathématiques entre les trois grandeurs de la vibration déplacement, vitesse et accélération, ces relations sont:

$$X = \frac{V}{2\pi f} = \frac{\gamma}{(2\pi f)^2}$$

$$V = \frac{\gamma}{2\pi f} = 2\pi f \cdot X$$

$$\gamma = (2\pi f)^2 \cdot X = 2\pi f V$$

3.20-Analyse spectrale

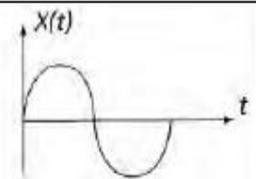
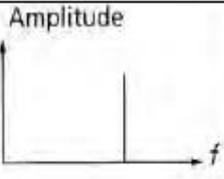
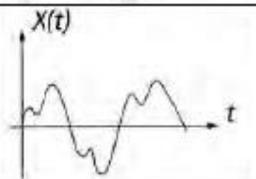
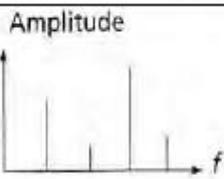
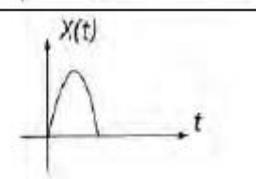
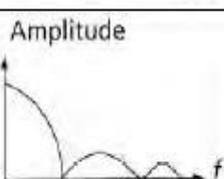
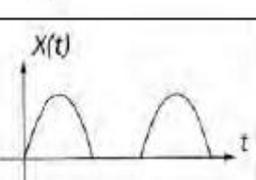
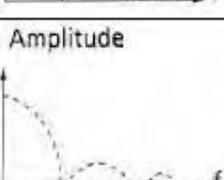
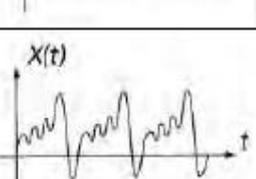
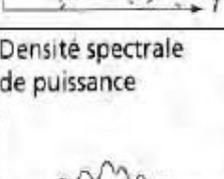
Le diagnostic vibratoire est basé sur l'identification de la fréquence, de la vibration générée par un phénomène mécanique

La méthode mathématique permet de représenter en effectuant la transformée de fourrier, le signal complexe de la vibration par un spectre fréquentiel

Selon la nature du signal vibratoire on obtient un spectre de raie discrète ou un spectre continu.

Le spectre se présente sous forme graphique montrant l'amplitude à chaque fréquence.

Tableau 3.2 - différents types de vibrations [47]

Nature des vibrations	Forme temporelle	Forme spectrale	Phénomène générateur
sinusoïdale			balourd
Sinusoïdale complexe			Effort dynamique d'engrènement
transitoire			Explosions marteaux-pilons, laminoirs.
Transitoire périodique			Presses automatiques, cames
aléatoire			Oscillations de pressions exercées sur une structure baignant dans un fluide en écoulement.

3.20.1-Variation périodique non harmonique

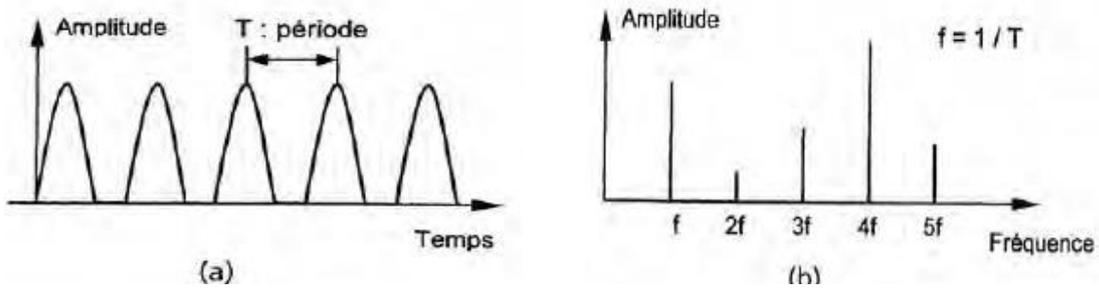


Figure3.19 : (a) signal temporel, (b) forme spectrale [47]

3.20.2-amplitude

L'amplitude d'une onde est la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre. On définit :

- L'amplitude de crête A_c : amplitude maximale par rapport au point d'équilibre
- L'amplitude de crête à crête A_{cc} : amplitude double
- L'amplitude efficace A_{eff} : le niveau efficace ou RMS (Root Mean Square)

$$A_{eff} = \frac{A_c \sqrt{2}}{2} = 0.707 A_c$$

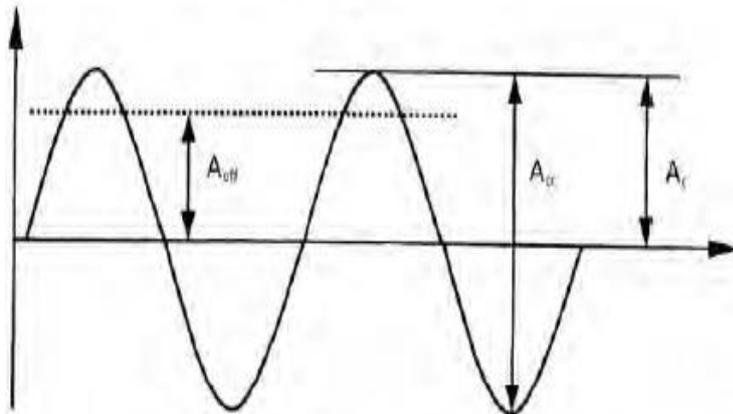


Figure 3.20 : signal périodique [47]

3.20.3-Fréquence

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se sépare pendant une unité de temps choisie la seconde. La fréquence s'exprime en hertz (Hz), 1 hertz = 1cycle/seconde

3.21-Méthodes de mesure par les capteurs

3.21.1-Capteurs de vibration

Le rôle des capteurs est de transformer l'énergie mécanique dispensée par la machine en un signal électrique proportionnel mesurable de manière reproductible. On constate deux types de capteurs.

- Les absolus→ accéléromètres (piézo-électrique), vélocimétries
- les relatifs→ proximètres

3.21.1. a- L'accéléromètre (piézo - électrique)

Est composé d'un matériau (piézo- électrique, lorsque ce matériau subit une contrainte mécanique en extension, compression, ou cisaillement il engendre une charge électrique proportionnelle à la force appliquée

Ils sont utilisés pour leur large gamme de fréquence d'utilisation

Ils sont destinés aux mesures axiales, à la surveillance continue, à l'utilisation de la haute température à la mesure de chocs de fortes intensités.

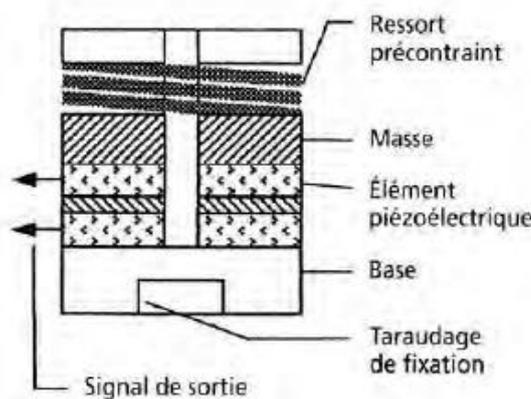


Figure 3.21 accéléromètre piézo- électrique [47]

3.21.1. b- Vélocimétrie

Est un capteur électrodynamique, auto générateur d'une tension proportionnelle à la vitesse de déplacement de la bobine. Ayant un signal de sortie de haut niveau et une faible bande passante de 10 à 1000 Hz

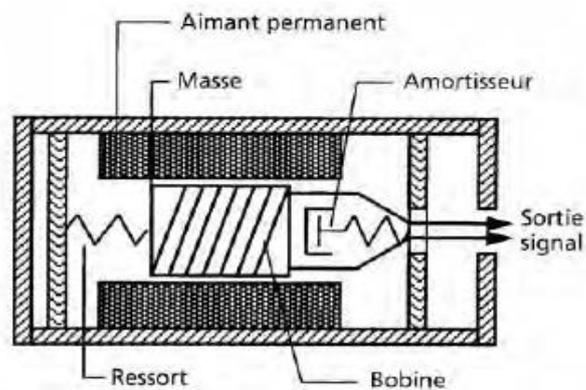


Figure3.22 : Capteur électrodynamique

3.21.1. c-Capteur de déplacement

Est un capteur sensible aux hautes fréquences.

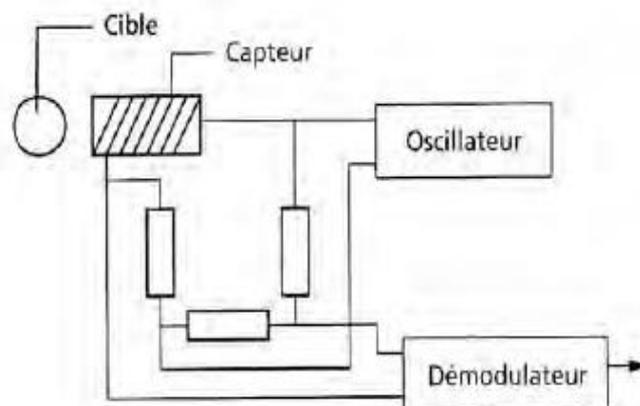


Figure 3.23 : capteur de déplacement [47]

3.22-Surveillance continue

Cette installation de surveillance continue figure 3.24 permet

- La comparaison de mesures continues avec les seuils d’alarmes et d’arrêt
- La possibilité d’avoir des « canaux de filtrage» pour assurer la surveillance avec gammes de fréquences

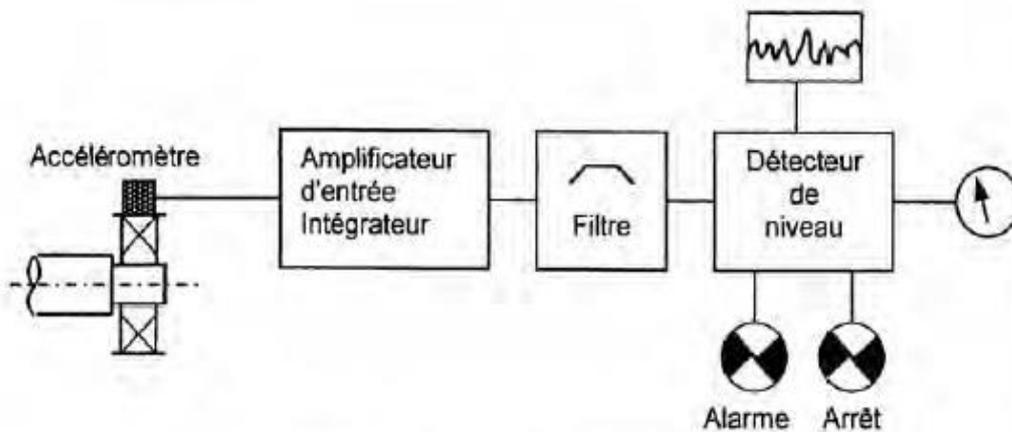


Figure 3.24: système de surveillance continue [47]

—La mise en place demande en premier lieu la sélection des machines à suivre en contrôle vibratoire.

- On utilise des critères de production suivis des critères des coûts et des puissances.
- Les machines choisies sont celles qui remplissent l’un des critères
- La périodicité de contrôle sera fonction du taux de d’engagement de la machine, elle est trimestrielle pour un fonctionnement normal
- La fréquence de contrôle doit être augmentée dès qu’il y’a un signe de dégradation.

3.23-Exemple d'un point de mesure

3.23.1-Localisation

Les interférences entre vibrations d'origine différentes rendent l'exploitation des relevés très délicate. 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 ce point peut être négligé, puisque la sensibilité transversale est inférieure à 1 % de celle de l'axe principal.

Si la machine le permet, les mesures se font suivant les trois axes : Axial, horizontale et vertical.

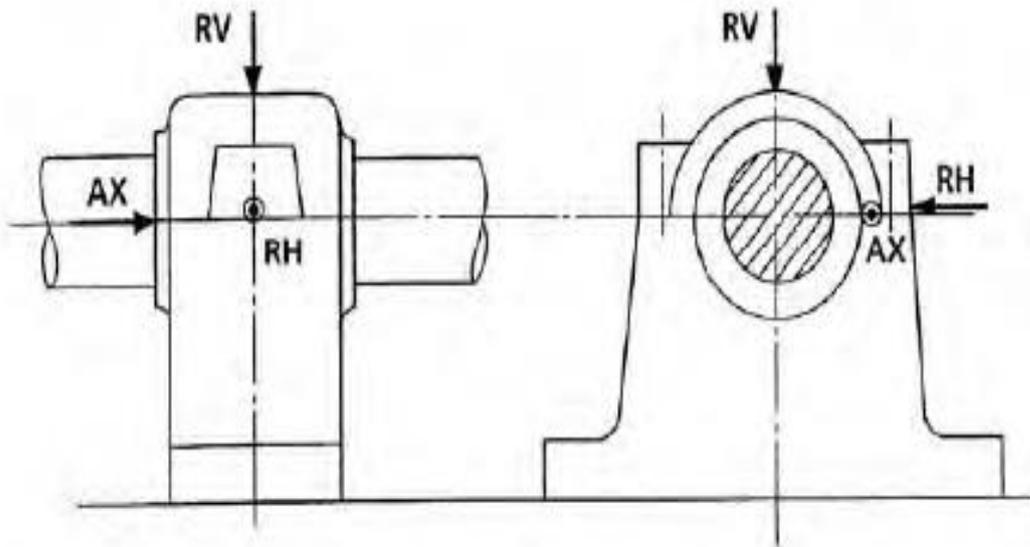


Figure 3.25 : Point de mesure [47]

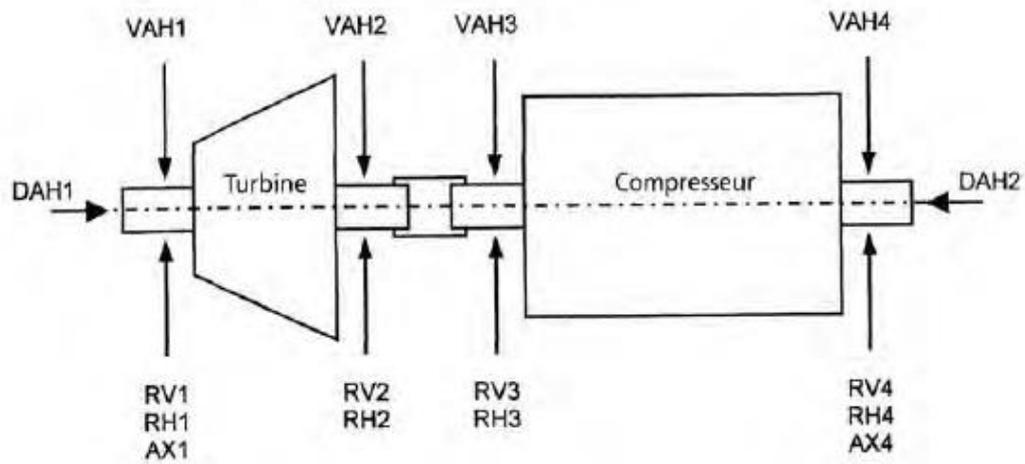


Figure3.26: Exemple de mesure de vibration d'un turbocompresseur. [47]

Les capteurs d'accélération :

RV : radial vertical

RH : radial horizontal

AX : axial

Les sondes de proximités : DAH et DAV

3.24- Conclusion

Les progrès récents de l'optique, de l'électronique, de l'informatique les techniques de traitement du signal ont permis le développement de nouvelles méthodes de contrôle non destructif. Parmi celles-ci, on peut citer la thermographie infrarouge active stimulée, la détection ultrasonore, l'analyse d'huile. Pour assurer une maintenance conditionnelle prédictive efficace ce qui n'est pas une tâche facile, mais l'analyse vibratoire reste comme même la méthode de surveillance la plus répandue et la plus utilisée vue les avantages qu'elle présente en comparaison avec les autres méthodes. C'est est un outil d'investigation très performant qui permet de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes à savoir les défauts de balourd, de désalignement, roulements défectueux. L'analyse vibratoire est la boule de cristal de la maintenance. Au travers de ses différentes études [48, 49, 50], les recherches s'attache aujourd'hui à mieux cerner les limites de ces contrôles non destructifs afin de pouvoir définir clairement les moyens à mettre en œuvre en fonction des besoins nécessaires à chaque cas industriel. Qui semblent promettre un bel avenir à ces méthodes- de contrôle non destructif pour l'analyse des machines.

4- Conclusion générale

Pour que la maintenance prédictive soit efficace, il faut des mesures précises et fiables de l'état des machines.

L'analyse vibratoire est un moyen utilisé pour suivre la santé des machines tournantes en fonctionnement.

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

Le problème principal en matière de maintenance est les arrêts non planifiés et le vieillissement des machines. Les arrêts non planifiés peuvent interrompre les opérations quotidiennes et avoir des conséquences négatives sur l'expérience client et Le vieillissement limite la croissance et l'adoption des technologies.

Le concept de la maintenance prédictive peut être utilisé pour optimiser l'efficacité opérationnelle et la structure des coûts des processus de maintenance.

La maintenance prédictive est un outil puissant qui permet d'améliorer l'expérience client et de développer de nouveaux modèles d'entreprise. Cette approche peut être la clé de la fidélisation des clients ainsi qu'un facteur de croissance.

Bibliographies

- [1] Bazovsky I., Reliability Theory and Practicel, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1961.
- [2] Jardine A.K.S., Maintenance, replacement and reliabilityl, Wiley, New York, 1973.
- [3] Kelly A., Maintenance and its managementl, Proceedings of the Communication Conference, Surrey, England, 1989.
- [4] Y. Kerboua Ziari, Présentation d'une méthodologie de gestion des processus de maintenance. Ecole Nationale Polytechnique d'Alger Laoucine Kerbache, HEC paris France. Symposium International : Qualité et Maintenance au Service de l'Entreprise QUALIMA01 - Tlemcen 2004 .
- [5] Z. Simeu-Abazi, M. DI Mascolo, D.M. Pham, maintenance pré-conditionnelle, laboratoire d'Automatique de Grenoble .
- [6] H.Procaccia, R.Cordier, Application of Bayesian statistical decision theory for a maintenance optimisation problem, Reliability Engineering and System Safety . 55(1997)143-149.
- [7] R. Sarker, A. Haque, Optimisation of maintenance and spare provisioning policy using simulation, Applied Mathematical Modelling 24(2000) 751-760.
- [8] (Source: EPRI Electric Power Research Institute)
- [9]. Goguelin, P, La prévention des risques professionnels, Que sais-je ? PUF, Paris, 1996.
- [10]. E Garcia, H Guyennet, J.C Lapayre, N Zerhouni, A new industrial cooperative télémaintenance platform. Computers & Industrial Engineering, Volume 46, Issue 4, July 2004, Pages 851-864.
- [11] ANPE, *Entretien, maintenance*, coll. ROME, Description et évolution des métiers, Paris, La Documentation française ,
- [12] (*Extrait norme NF EN 13306X60-319*).
- [13]. Lung B, Morel G, Leger J.B, Proactive maintenance strategy for harbour crane opération improvement, Robotica, vol 21, 2003, pp 313-324.
- [14] IEC 60300-3-11. *Dependability management - Part 3-11: Application guide - Reliability centred maintenance*, 1999.
- [15] ANPE, *op. cit.* p. 17; MICT, *op. cit.* p. 30; Michel GOSSELIN, *Ibid.*
- [16] 60-000, F. X. Maintenance industrielle - fonction maintenance. *Norme AFNOR* (2002).
- [17]. Deloux E., Castanier B., and Bérenguer C., Optimisation de la politique de maintenance

pour un système à dégradation graduelle stressé, 7ème Congrès international pluridisciplinaire Qualité de Sûreté de Fonctionnement, 20, 21 et 22 mars 2007, volume 1, pages 142–149, Tanger (Maroc), 2007

[18] IUNG, B., MOREL, G., AND LEGER, J. Proactive maintenance strategy for harbour crane operation improvement. *Robotica* 21, 03 (2003), 313–324.

[19] Iung B., Morel G. and Leger J.B., *Proactive maintenance strategy for harbor crane operation improvement*, *Robotica*, Vol.21, pp. 313-324, 2003.

[20] Leger J.B., *Maintenance & Transports : De la e-maintenance de sites industriels...a la e-maintenance de flottes*, *PREDICT*, 2007.

[21] Vrignat P., *Reseaux Locaux Industriels / Cours et Travaux Pratiques*, Gaëtan MORIN Editeur Europe, 1999.

[22] Vrignat P., Begot S., Duculty F. and Avila M., *Une nouvelle approche de la maintenance "on line" : un cas d'ecole*, Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes (CETSI), 2008.

[23] Iung B., *From remote maintenance to MAS-based e-maintenance of an industrial process*, *International Journal of Intelligent Manufacturing*, 14 (1), pp. 59–82, 2003.

[24] NASA., *Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment*, February, 2000.

[25] Despujols A., *Optimisation de la maintenance par la fiabilité (OMF)*, MT9310, Techniques de l'ingénieur, Octobre, 2004.

[26] Zwingelstein G., *La Maintenance basée sur la fiabilité - Guide pratique d'application de la RCM*, Editions HERMES, 1996.

[27] Cotaina N., Matos F., Chabrol J., Djeapragache D., Prete P., Carretero J., García F., Perez M., Pena J.M. and Perez J.M., *Study of existing reliability centered maintenance (RCM) approaches used in different industries*, TR Number FIM/110.1/DATSI/00, Facultad de Informatica de Madrid, 2000.

[28] Cotaina N., Matos F., Chabrol J., Djeapragache D., Prete P., Carretero J., García F., Perez M., Pena J.M. and Perez J.M., *Study of existing reliability centered maintenance (RCM) approaches used in different industries*, TR Number FIM/110.1/DATSI/00, Facultad de Informatica de Madrid, 2000.

[29] Bloch H.P., Geitner F.K., —Machinery failure analysis and trouble shooting, Gulf Professional Publishing, 1997.

[30] Pusey H.C., Roemer M.J., —An assessment of turbomachinery condition monitoring and failure prognosis technology, *The Shock and Vibration Digest* 31, 365–371. 1999.

- [31] Jardine A.K.S., Lin D., Banjevic D., —A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenancel, *Mechanical Systems and Signal Processing* 20, 1483–1510, 2006.
- [32] Basile O., «Prise en compte de l'incertitude dans les modèles fiabilistes industriels, Extensions aux sollicitations variables». Thèse de doctorat, Faculté Polytechnique de Mons, 2007.
- [33] Vachtsevanos G., Lewis F., Roemer M., Hess A., Wu B., —Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systemsll, Wile, Hoboken, NJ, 2006.
- [34] St-Marseille M. and Lapointe J.B., *La gestion des équipements vers l'entretien préventif*, Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail Secteur fabrication de produits en métal et de produits électriques, Bibliothèque nationale du Québec, 1997 .
- [35] Afnor .
- [36] Monchy .
- [37]: les start-up et les entreprises spécialisées .
- [38] Selon R. Keith Mobley,
- [39] Pajani D., *Mesure par thermographie infrarouge*, Chap. 1 – Introduction, p. 11, ISBN 2-9504171-0-8, 1989
- [40] Pajani D., *Mesure par thermographie infrarouge*, Chap. 8 – Les applications de lathermographie, p. 331, ISBN 2-9504171-0-8, 1989
- [41] Maldague X., *Introduction to NDT by active infrared thermography*, *Materials Evaluation*, Vol. 6, No 9, pp. 1060 -1073, 2002
- [42]La thermographie infrarouge active et ses nouvelles applications aux matériaux métalliques maillards. (1), cadith j. (1), walaszekh. (1), bodnarj.l. (2) (1) CETIM – Pôle Ingénierie Contrôle et Mesures e-mail : samuel.maillard@cetim.fr (2) GRESPI – UFR Sciences Exactes et Naturelles E-mail : jl.bodnar@univ-reims.fr .
- [43]- **Elaboré par : Chouchéne Mohamed (ISET Siliana)**
- [44] Elaboré par : **Chouchéne Mohamed** — ISET Siliana—Analyses des huiles
- [45]-**MAX J, DIOT M, BIGRET R, 1986**, Les analyseurs de spectre à FFT*et les analyseurs de spectre à corrélation, *Traitement du Signal*, volume 3 - n° 4-5
- [46]-**GRUSENMEYER C, 2005a**, Les accidents du travail liés à la maintenance, importance et caractérisation, *Cahiers de notes documentaires*, 4ème trim 2005, INRS, Paris.

[47]: **jean Héng** -usine nouvelle- pratique de la maintenance préventive- DUNOD-
<http://fribok.blogspot.com/>

[48] Maillard S., Cadith J., Walaszek H., Dillenz A., Bodnar J.L., La thermography infrarouge stimulée, une nouvelle technique de contrôle sur les lignes de production ?, COFREND congress proceedings, Toulouse (France), 2008 .

[49] Maillard S., Cadith J., Legros G., Chevallier C., Walaszek H, Bodnar J.L., Candore J. C., Thermographie et matériaux métalliques, Thermogram congress proceedings, Reims (France), 2009 .

[50] Maillard S., Cadith J., Eschimese D., Walaszek H, Mooshofer H., Candore J. C., Bodnar J.L., Towards the use of passive and active infrared thermography to inspect metallic components in the mechanical industry, QIRT congress proceedings, Laval (Quebec), 2010

Principales limitations

▪ Spectres parfois difficiles, ▪ Dans le cas de surveillance continue, installations relativement coûteuses.

Champs d'applications

privilégiée

▪ Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure.

▪ Ne permet pas de localiser précisément le défaut, ▪ Nécessite de prendre

▪ Contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de

