

L'introduction générale

Pendant ces dernières décennies, la surveillance et le diagnostic des machines tournantes par l'analyse des vibrations sont devenus un outil efficace pour détecter les défauts et suivre leurs évolutions dans le temps, ce qui permettra de projeter un plan d'entretien prédictive. Dans le but d'améliorer le système de surveillance et le diagnostic des équipements industriels beaucoup de chercheurs ont travaillé sur le développement et la conception des capteurs de vibration. Certains travaux [1] ont décrit le capteur de vibration de résonance réalisé à l'aide d'un micro-usinage du silicium pour la surveillance de l'usure des machines tournantes. D'autres [2] ont démontré une amélioration de la performance des capteurs de vibrations sans contact basés sur des lasers à semi-conducteurs à cavité externe. Cette technique réduit les pics spectraux dans les lasers à cavité externe avec rétroaction optique modérée par modulation du courant continu. Un nouveau capteur de vibrations micro-optique est réalisé en combinant "optique intégrée" et "micro-usinage" sur les technologies de silicium a été présenté par Ollier et al [3]. La sensibilité et large gamme de fréquence a été obtenue en utilisant une section multi-mode dans le circuit de détection optique. Tandis que le développement d'un nouveau capteur de vibration à fibre optique de type boucle à l'aide d'une fibre optique classique a été conçu par Oshawa et al [4]. Le principe de la détection de ce capteur est basé sur l'effet Doppler à fibre optique courbée, et la fréquence des ondes lumineuses transmises à travers une fibre courbée est décalée par vibration à la zone courbée. La proposition d'un nouveau capteur tactile utilisant la vibration piézoélectrique a été faite par Motoo et al [5]. Il comprend deux matériaux piézoélectriques, l'un est utilisé pour la vibration de l'élément capteur et l'autre est utilisé pour la mesure de la variation de l'impédance mécanique induite par une force externe.

Le travail de Sebastia, J.P et al [6] présente un détecteur de vibrations à faible coût et à faible consommation d'énergie basée sur la mesure des variations du champ magnétique induit dans un récent SS501 magnétorésistance géante (GMR) de capteur magnétique, qui n'a jamais été appliquée. La vibration sur les petites pièces ferromagnétiques perturbe le champ magnétique de la terre. Ces perturbations faibles peuvent être détectés et mesurés sur le champ magnétique de la terre supposée constante, qui est uniforme sur une large zone. Une nouvelle configuration de réseau de trois capteurs GMR en demi-pont alimenté en chaîne est utilisé pour mesurer des variations de champ magnétique dans les directions X, Y, et Z avec une très faible consommation électrique. Un système de détection des vibrations à double fibre optique avec un nouveau type de membrane a été exposé par Li, Rui et al [7]. Ce capteur est basé sur une modulation d'intensité optique et caractérisé par la membrane utilisée pour détecter les vibrations. Tandis que Li Xuejun et Al [8] ont développé un nouveau procédé de fusion de données sur la base de la fonction de

corrélation pour déterminer la valeur pondérée qui améliore la précision de la mesure du signal vibratoire dans le processus de diagnostic des défauts des machines tournantes. Le procédé ne nécessite pas de connaître la connaissance a priori sur les capteurs, et la valeur pondérée des capteurs peut être déterminée sur la base de la mesure de corrélation des données en temps réel testés dans le processus de fusion. Par contre Yuelan Lu et Al [9] ont conçu un capteur de vibration distribué en utilisant la détection hétérodyne et de traitement du signal de déplacement moyen et le déplacement différentiel de la phase de temps réflectométrie optique de domaine. Les composantes à large bande de fréquences acoustiques générées par vibration crayon de rupture ont été mesurées et identifiées par notre emplacement capteur de vibrations distribuée pour la première fois. Le capteur de vibration de mode multi-longitudinal à fibre optique a été présenté par Liang Gao et Al [10]. La fréquence de battement de deux modes laser différentes est modulée par le signal de vibration. Le signal de battement peut être modulé en fréquence démodulé par un démodulateur à modulation de fréquence. Il est démontré que la vibration de 60 Hz à 20 KHz peut être mesurée avec succès. Récemment Sukwon Choi et Al [11] ont proposé un système de suivi de pipeline basé sur des capteurs piézoélectriques pour remplacer l'actuel système de détection ayant une consommation d'énergie élevé. La majorité des travaux réalisés ces dernières années sont axés sur la conception des capteurs, peu de travaux ont été réalisés sur l'amélioration des performances du capteur de vibration par la réduction de son erreur de mesure ou l'augmentation de sa sensibilité.

Actuellement, l'erreur de mesure des différents types des capteurs de vibration (accéléromètres) est estimée à plus de 5%. Cette valeur influe négativement sur le résultat de mesure réalisé par le capteur de vibration. C'est pour cette raison que nous nous sommes intéressés à la réduction de l'erreur de mesure et augmentation de la précision du capteur pour que la valeur mesurée du niveau de vibration soit proche de la valeur réelle. Pour atteindre cet objectif notre mémoire est structurée en trois chapitres dans les lignes directrices sont donnés ci-après:

Le premier chapitre est consacré à l'analyse vibratoire des machines tournantes qui constitue un outil puissant de détection des défauts. Après une définition de la vibration, de sa nature et de ses amplitudes, on détermine le choix des grandeurs physiques à mesurer.

Le deuxième chapitre présente la notion de capteur en général et le capteur de vibration en particulier.

Le troisième chapitre est la partie spéciale de cette thèse où on a présenté la modélisation, simulation et l'analyse expérimentale du capteur de vibration. Un modèle mathématique convenable à ce capteur a été développé. Ce dernier a été validé en utilisant un programme de simulation sous MATLAB qui calcule le module de mouvement relatif et son erreur de mesure. Le modèle développé facilite le choix de la gamme de fréquence proportionnelle à

-----**Introduction générale**-----

l'accéléromètre et son taux d'amortissement cela permet d'améliorer les performances du capteur étudié. Finalement, une validation par des essais expérimentaux a été réalisés et les résultats obtenue ont été comparés et analysés.

Une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et leur importance ainsi que les perspectives ont été donnés à la fin de ce travail.

Chapitre I : Analyse vibratoire des machines tournantes

I.1. Introduction

I.2. La maintenance et ses types

I.3. Le principe de la maintenance conditionnelle

I.4. Les objectifs de la maintenance préventive conditionnelle

I.5. Le choix d'une stratégie de maintenance

I.6. Surveillance, diagnostic et suivi

I.7. L'analyse vibratoire

I.8. Les vibrations

I.9. Conclusion

Chapitre I

L'analyse vibratoire des machines tournantes

I.1. L'introduction

Une entreprise doit exploiter ces équipements d'une manière efficace dans le but d'améliorer la qualité et le coût du produit et augmenter aussi la production. Une bonne gestion de la maintenance des équipements est le meilleur moyen qui permet d'atteindre cet objectif en prenant en considération les aspects techniques, économiques et financiers des différentes méthodes utilisées.

Le niveau de performance d'une installation industrielle dépend directement de la fonction maintenance. L'optimisation de cette dernière est une opération complexe car elle doit prendre en considération des critères parfois contradictoires tels que la disponibilité et les coûts [12], [13]. Les critères qui influent sur la maintenance d'une installation industrielle sont : le type de maintenance, les types de tâches et leur fréquence et aussi le niveau d'intervention.

L'objectif principal de la maintenance est de réduire au minimum la défaillance des équipements pour éviter les arrêts de production. L'augmentation de la fiabilité des équipements et la maîtrise des défaillances et des pannes dépend du développement de la maintenance préventive.

La maintenance joue un rôle très important dans le domaine industriel, la plus parts des industries appliquent la politique de maintenance pour réduire ou éliminer les réparations inutiles, empêcher les pannes des installations industrielles et minimiser l'impact négatif de l'opération de maintenance sur le rendement des entreprises.

La maintenance préventive conditionnelle est la plus utilisable dans les différents organismes industriels car sa surveillance et son suivi ne nécessitent pas l'arrêt de production.

Généralement la machine tournante en opération génère des efforts qui causent par fois la défaillance des éléments de la machine. Pour réaliser un bon diagnostic, il faut choisir l'outil de la maintenance préventive conditionnelle tel que l'analyse vibratoire, analyse des huiles, thermographies ...etc.

Pour la détection précoce de la plupart des défauts rencontrés sur les machines de production, il faut réalisées des mesures suivi par des techniques d'analyse sur les machines en fonctionnement (par exemple l'analyse vibratoire). Les différents défauts captés par la technique de l'analyse vibratoire sont : le désalignement des arbres, le mauvais accouplement

des machines, la dégradation des accouplements, les jeux, l'usure des roulements et même les défauts électriques peuvent être détectés suffisamment tôt pour planifier une intervention avant la panne.

Dans ce chapitre, l'analyse vibratoire est largement décrite et expliquée pour montrer son importance dans le but de prévoir et détecter les pannes des équipements (maintenance préventive conditionnelle). Cette méthode est riche en information et son objectif principal est d'éviter les pannes des machines tournantes.

I.2. La maintenance et ses types

1.2.1. La définition de la maintenance

La maintenance est définie dans la norme NF EN 13306 comme un ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de gestion pendant la durée de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction bien déterminée [14].

1.2.2. Les méthodes de gestion de maintenance

Deux directions concernant les procédures de maintenance dans l'industrie sont nécessaires:

La première, pendant l'arrêt ou le ralentissement de la production, les ingénieurs de maintenance profitent pour inspecter les machines. La seconde approche est de réagir à une panne lorsqu'elle se produit [15].

1.2.3. Les différents types de maintenance

L'organigramme illustré dans la Fig. I.1 montre les deux types de maintenance (préventive et corrective) et résume leur fonction.

On remarque que la maintenance préventive est divisée en deux types de maintenance :

- 1- maintenance systématique,
- 2- maintenance conditionnelle qui conduit à la maintenance prévisionnelle programmée pour diagnostic précis de l'état de l'installation effectué pendant le fonctionnement.

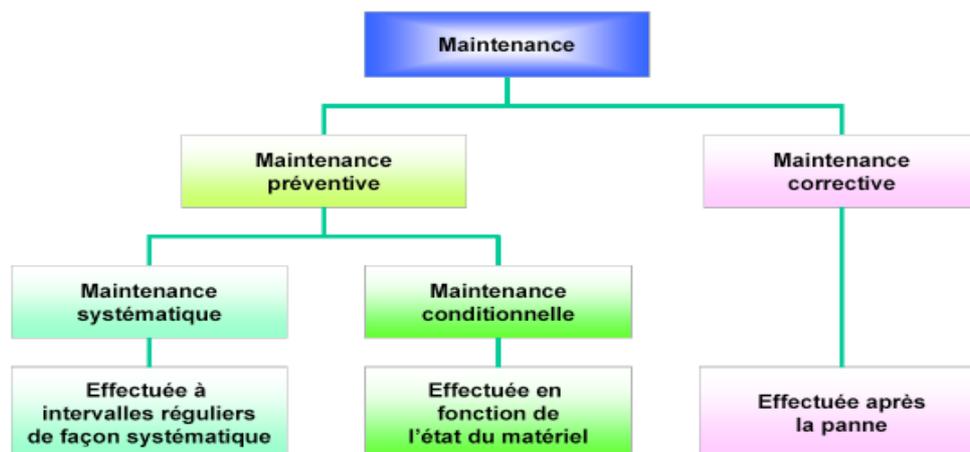


Fig. I.1. L'organigramme des différents types de maintenance [29]

I.2.3.1. La définition de la maintenance corrective

La norme NF EN 13306 définit la maintenance corrective comme suit : exécution d'une opération après détection d'une panne pour remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise [14].

Dans ce type de maintenance on attend l'apparition de la panne pour intervenir. On distingue deux aspects de maintenance : la maintenance palliative et la maintenance curative.

- ✓ Maintenance palliative : est défini par l'opération de dépannage dans le cas d'une panne partielle, son objectif est de gommer les conséquences de la panne et permettre au matériel de fonctionner jusqu'à l'arrêt préventif.
- ✓ Maintenance curative : est défini par l'opération de réparation dans le cas d'une panne totale, le but de cette maintenance est de remettre le matériel en marche [14].

I.2.3.2. La définition de la maintenance préventive

La maintenance préventive destinée à minimiser la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien [15]. Les opérations de cette maintenance sont réalisées par des interventions prévues, préparées et programmées selon des critères différents pour éviter la défaillance probable. Il existe plusieurs opérations de maintenance préventive [16]:

- le nettoyage,
- lubrification des points de frottement,
- la visite et l'inspection réalisées à l'arrêt et en marche, par les utilisateurs comme par les professionnels de la maintenance,
- le contrôle,
- la révision partielle ou totale,
- l'analyse des vibrations (mesure) et des huiles.

Dans ce type de maintenance on distingue :

a) La maintenance préventive systématique

La maintenance préventive systématique définit par la norme AFNOR X 60-010 [17] comme étant un ensemble des activités correspondantes déclenchées selon un plan établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unité d'usage. Les changements des pièces et des fluides ont lieu quel que soit leurs états de dégradation, et ce de façon périodique.

b) La maintenance préventive conditionnelle

Cette maintenance se traduit par une surveillance des points sensibles des équipements et définit par la norme AFNOR X 60-010 [17] comme étant un ensemble des activités de maintenance déclenchées selon des critères prédéterminés et significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service.

c) La maintenance prédictive (prévisionnelle)

La maintenance prédictive est l'étape finale de l'entretien, elle est réalisée d'après les prévisions imaginées de l'analyse et de l'appréciation des critères significatifs de la dégradation du bien (norme NF EN 13306) [17].

I.3. Le principe de la maintenance conditionnelle

La Fig. I.2 montre le principe de la maintenance conditionnelle (les interventions de la maintenance préventive conditionnelle). Une intervention préventive conditionnelle (IPC) programmée, s'il y a une mesure périodique d'une dégradation touchant le seuil d'alarme (un arrêt préventif) [17].

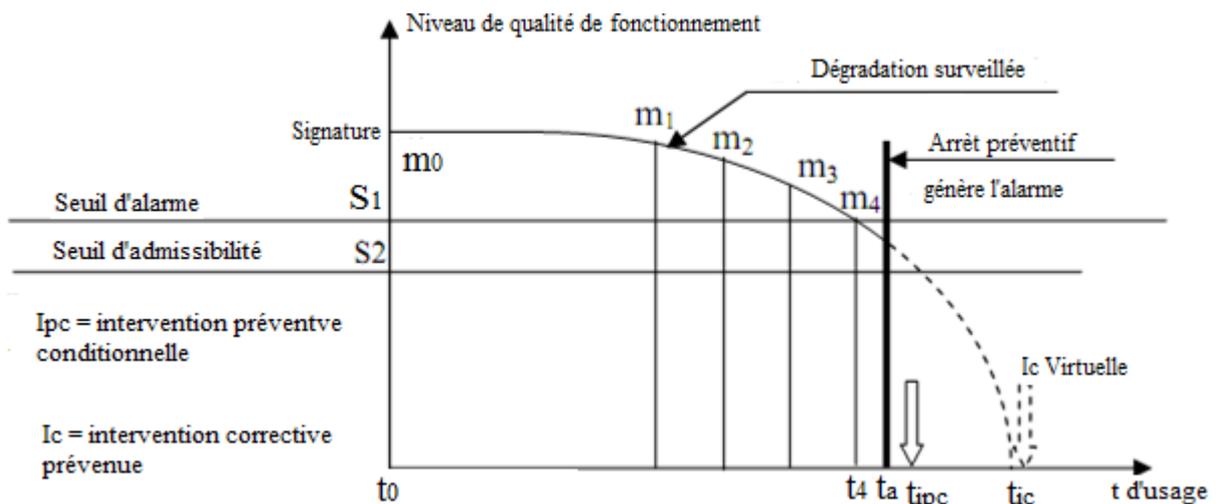


Fig. I. 2. L'intervention de la maintenance conditionnelle [17].

La signature est définie par une prise de référence de l'état de bon marche à l'origine. Les mesures sont de simples observations visuelles, des images (spectre...). Probablement, elles sont changées par des alertes présélectionnées, ou des visites espacées de Δt de telle façon que la dégradation à prévenir ne puisse échapper à la surveillance :

$$\Delta t < t_{\text{admissibilité}} - t_{\text{alarme}}$$

La connaissance de la loi de dégradation, nous permet de prendre des mesures qui ne peuvent pas débuter à t0 (sauf signature). Les mesures peuvent être collectées par rondes au niveau du centre de surveillance.

- l'arrêt sera demandé automatiquement par l'alarme, ou différé par une décision volontaire jusqu'à l'IPC programmée et organisée.
- l'intervention préventive conditionnelle sera préparée à partir de l'alarme, selon un temps de réflexe du service de maintenance prédéterminé.

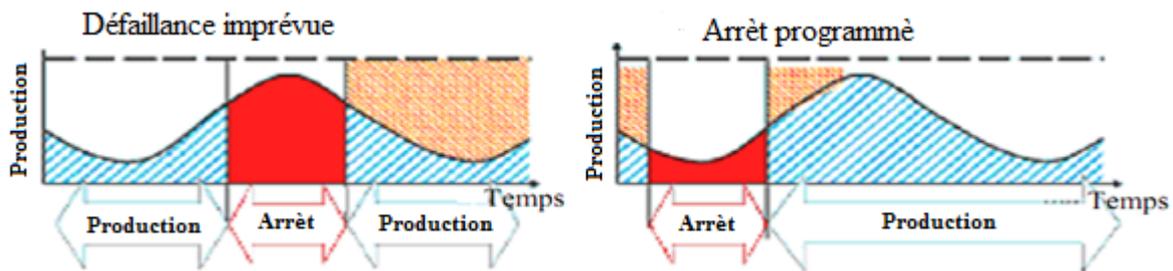


Fig. I.3. Le temps d'intervention de la maintenance et son impact sur la production [18].

I.3.1. Les différentes techniques de la maintenance préventive conditionnelle

Les techniques de la maintenance préventive conditionnelle sont utilisées pour suivre et surveiller les installations industrielles ou les systèmes électromécaniques, parmi ses techniques on distingue :

I.3.1.1. L'analyse de vibrations

La surveillance par l'analyse vibratoire des systèmes électromécaniques dans les installations industrielles est l'outil préventif de la maintenance. Cette technique est largement utilisée dans la majorité des installations. Elle détecte pratiquement toutes les anomalies susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Un défaut d'alignement, un roulement usé, ou un jeu, s'explique par un changement des efforts internes que subit la machine, cela conduit à une modification de son comportement vibratoire [19].

On peut suivre et surveiller l'état d'un équipement, si on place des capteurs de vibration aux endroits où se transmettent ces efforts (sur les paliers des machines). L'avantage principal de l'analyse vibratoire est la facilité de prendre des mesures, la détection des défauts à un stade précoce et la possibilité de réaliser un diagnostic approfondi pour déterminer l'origine [19].

I.3.1.2. L'analyse des huiles

L'analyse des huiles est une autre technique de surveillance, qui décide l'état d'huile ou de graisse utilisée dans l'appareillage. La méthode consiste à analyser les particules d'usure drainées par le lubrifiant, afin d'en inférer l'état de l'installation [20].

I.3.1.3. La technique de la thermographie

Dans le domaine de la maintenance, la thermographie infrarouge joue un rôle très important. Elle est réservée pour le contrôle d'installations électriques et peut être utilisée dans la surveillance des machines tournantes.

Pour déterminer la condition de fonctionnement, elle emploie l'instrumentation conçue pour surveiller l'émission de l'énergie infrarouge (température de surface). En décelant des anomalies thermiques (les endroits qui sont plus chauds ou plus froids), un expert peut identifier et expliquer les problèmes débutants au sein de l'usine.

Les éléments de base d'un appareil infrarouge industriel sont le système optique, les capteurs de rayonnement, et d'autre forme d'indicateur. Le système optique collecte l'énergie sur un capteur pour la transformer en signal électrique, puis un dispositif électronique amplifie le signal de sortie et le transforme en une mode affichable.

La thermographie autorise d'accomplir des mesures à distances, et de procurer instantanément une représentation thermique de la zone contrôlée [19].

I.3.1.4. L'analyse acoustique

L'analyse acoustique est une technique de la maintenance préventive conditionnelle, permet de détecter les défauts par l'étude des ondes et des vibrations sonores acoustiques générés par les systèmes électromécaniques.

La mesure de son (bruit) effectuée à l'aide d'un sonomètre qui évalue le niveau de pression acoustique. Ce dernier est ainsi transformé en un signal électrique, comparable en amplitude et en fréquence au phénomène acoustique. Le signal électrique peut être conditionné, échantillonné et traité de manière à caractériser le bruit mesuré. On peut ainsi par exemple déterminer des valeurs acoustiques exprimées en dB(A), effectuer des analyses fréquentielles, des analyses statistiques, et intégrer le signal sur une durée déterminée.

I.3.2. Le choix de la technique de surveillance

Chaque technique de surveillance, ne permet pas de capter les mêmes types de défauts, ni d'opérer un diagnostic détaillé pour connaître l'origine, la gravité du défaut et le domaine d'application favorisé pour chaque technique de surveillance, voir (Tableau I.1, et I.2). Donc, avant de préférer la technique de surveillance, il doit déterminer la criticité de sa machine à l'aide de l'historique de défaillances qui touchent cette dernière et son dossier technique [20].

I.3.2.1. La comparaison entre les techniques de maintenance préventive conditionnelle

Les éléments de comparaisons entre les différentes techniques de la maintenance préventive conditionnelle [20] sont montrés dans le tableau ci-dessous:

Tableau. I.1. Comparaisons des outils de maintenance préventive conditionnelle

	Principaux privilèges	Principales limitations	Domaine d'applications favorisé
Analyse de vibration	<ul style="list-style-type: none"> - Découverte de défauts à une étape précoce - Occasion d'effectuer un diagnostic détaillé - Permet une surveillance continue - Autorise le contrôle de l'équipement à distance (télémaintenance) 	<ul style="list-style-type: none"> - Spectres parfois difficiles à expliquer - Dans le cas de la surveillance continue, équipements relativement coûteuses 	<ul style="list-style-type: none"> - Découverte des défauts de tous les éléments cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure
Analyse d'huiles	<ul style="list-style-type: none"> - Dépistage d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou un dommage - Occasion de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules 	<ul style="list-style-type: none"> - N'autorise pas de localiser régulièrement le défaut - Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon 	<ul style="list-style-type: none"> - Vérification des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, découverte d'un manque de lubrification, analyse des éléments d'usure, analyse de transmission par le processus (étanchéité), etc.
Thermographie	<ul style="list-style-type: none"> - Permet d'effectuer un contrôle rapide de l'installation - Interprétation souvent immédiate des résultats 	<ul style="list-style-type: none"> - Découverte de défauts à un stade moins précoce que l'analyse vibratoire - Contrôle limité à ce que "voit" la caméra (échauffements de surface) - Ne permet pas d'accomplir un diagnostic approfondi 	<ul style="list-style-type: none"> - Localisation de tous les défauts produisant un échauffement (manque de lubrification en particulier)
Analyse acoustique	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de déceler l'apparition de défauts audibles - Autorise une surveillance continue 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité au bruit ambiant - Diagnostic souvent difficile à effectuer - Problèmes de répétition des mesures 	<ul style="list-style-type: none"> - Découverte d'un bruit inhabituel qui peut être expliqué par analyse vibratoire