

# REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

Département de génie mécanique

N° d'ordre :

Série :

**THÈSE**

Présentée pour obtenir le diplôme de Doctorat en Sciences  
**en Mécanique**

**OPTION**

*Maintenance industrielle*

Par

**CHAIB RACHID**

**THÈME**

**CONTRIBUTION A L'OPTIMISATION DE LA MAINTENANCE  
CONDITIONELLE PAR L'ANALYSE VIBRATOIRE**

Devant le jury :

Président	B. Necib	Professeur	Uni. Mentouri Constantine
Rapporteur	S. Méziani	Professeur	Uni. Mentouri Constantine
Co-rapporteur	I. Verzea	Professeur	Uni. Tech. Gh Asachi Roumanie
Examineur	D. El Alouci	Professeur	Uni. 20 Août 55 Skikda
Examineur	A. Benretem	Maître de conférence	Uni. Badji Mokhtar Annaba
Examineur	E.Hadjadj-Aoul	Maître de conférence	Uni. Badji Mokhtar Annaba
Examineur	T. Benmansour	Maître de conférence	Uni. Mentouri Constantine

Soutenu-le :

## **Avant-propos**

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes directeurs de thèse le Professeur Salim Méziani et le Professeur Ion Vesztea, pour leur soutien moral, pour leur confiance, pour les conseils judicieux qu'ils m'ont généreusement donnés et la passion de la recherche qu'ils m'ont transmise. Leur extrême générosité, leur compétence, leur dévouement et leur souci constant de l'excellence susciteront toujours mon respect et mon admiration.

Je tiens à témoigner ma reconnaissance à Monsieur B. Necib, professeur au département de génie mécanique de l'Université Mentouri de Constantine, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury et participer à l'examen de cette thèse.

Je suis extrêmement sensible à l'honneur que me fait le Professeur Daoud El Alouci, Université du 20 août 1955 de Skikda, département de génie mécanique pour l'intérêt qu'il a porté à cette recherche, pour avoir accepté d'examiner ce travail et de participer à ce jury

Mes remerciements vont également à messieurs A. Benretem et E.Hadjadj-Aoul maîtres de conférences au département de maintenance industrielle de l'Université Badji Mokhtar Annaba, d'avoir accepté de prendre part au jury. Je leur remercie tous pour l'intérêt qu'ils ont porté à ces travaux.

Cette thèse représente l'aboutissement d'un long parcours qu'il m'aurait sans doute pas été possible sans l'aide du bon dieu bien sûr et ensuite l'amour et le soutien moral et inconditionnel de mes parents, mes sœurs et frères, ma douce moitié Oum Hamza, mes enfants et surtout mes Enfants (de Rachid.Bouteldjoune et de Noui.Kebaili), J'espère qu'ils trouvent ici l'expression de mon éternel amour et reconnaissance.

Ma gratitude va aussi aux membres de ma famille, mes frères amis et à mes collègues de l'Université Badji Mokhtar Annaba et celles de l'Université Mentouri Constantine, sans oublier celles de la grande maison El kaoutar.

Un spécial remerciement est dédié à messieurs A.Bellaour, M.Benidir et E.Ferkous, maîtres de conférence au département de génie mécanique, T.Zarza, chef de département SETI et à mon ami frère M.Fédaoui pour leur soutien et ses encouragements.

Je tiens à exprimer à Monsieur le Professeur Ion Versea ma très vive gratitude pour m'avoir permis de mener à bien l'ensemble de ces travaux, pour les conseils qu'il m'a prodigués, pour ses encouragements et pour l'intérêt constant qu'il a porté à mes recherches.

## Sommaire

Avant-propos.....	i
Sommaire.....	ii
Liste des figures.....	iii
Introduction.....	1
Chapitre I	
1-Maintenance des systèmes industriels.....	6
1-1-Problématique.....	6
1-2-Objectif scientifique et enjeux.....	9
1-3- Les grands principes de la maintenance.....	12
1-3-1-Les critères de la maintenabilité.....	12
1-3-2-Comprendre la technologie.....	13
1-3-3-Les différentes formes de la maintenance.....	14
1-3-3-1-Maintenance corrective.....	15
1-3-3-2-Maintenance préventive.....	16
1-3-3-3-Maintenance prédictive.....	17
1-4-Les défaillances et leurs enjeux stratégiques.....	18
1-4-1-Les règles de l'efficacité.....	19
1-4-2-Définition de la défaillance.....	21
1-4-3-défaillance progressive.....	23
1-4-4-Défaillance soudaines.....	23
1-5-Cycle de vie d'un composant.....	24
1-6-Appréciation de l'état d'un matériel.....	26
1-7-Traitement d'un matériel défaillant.....	28
1-8-Technologie de la maintenance conditionnelle.....	28
1-9-Indicateurs de surveillance.....	31

---

1-10-Bibliographies.....	33
Chapitre II	
2- L'analyse vibratoire.....	36
2-1-Introduction.....	36
2-2-Les applications industrielles.....	38
2-3-Notions fondamentales.....	39
2-4-Généralités.....	41
2-4-1-Définition théorique d'une vibration.....	41
2-4-2-Description d'un signal vibratoire.....	41
2-4-3-Description d'un signal vibratoire .....	41
2-5- Les signaux.....	42
2-5-1-Vibrations harmoniques.....	42
2-5-2-Vibrations périodiques.....	43
2-5-3-Vibrations apériodiques.....	44
2-6-Signatures vibratoires.....	45
2-7-Représentations des signaux.....	46
2-8-Les analyseurs de spectre.....	48
2-8-1-Résolution.....	48
2-9-Detection et diagnostic des pannes.....	49
2-10-Grandeurs physiques caractérisant une vibration.....	51
2-10-1-Choix du mode d'investigation.....	52
2-10-1-1-Niveau global.....	53
2-10-1-2-Analyse spectral.....	54
2-10-2-Choix du type de suivi.....	56
2-10-3-Choix du paramètre à surveiller.....	57
2-10-3-1-La précocité.....	58
2-10-3-2-La sensibilité.....	59
2-10-4-Les points de mesurage.....	59
2-11-Bibliographie.....	60
Chapitre III	
3-Surveillance des roulements par analyse vibratoire.....	62
3-1-Introduction.....	62

---

3-2-Préventif de roulement en pratique.....	63
3-3-Causes potentielles de dégradation.....	65
3-3-1-Grippage et micro grippage.....	66
3-3-2-Fatigue.....	67
3-3-3-Processus de dégradation d'un roulement.....	68
3-4-Détection des défauts de roulement.....	71
3-4-1-Méthodes statiques.....	72
3-4-1-1-Valeur efficace.....	73
3-4-1-2-Valeur crête.....	73
3-4-1-3-kurtosis.....	74
3-4-1-4-Etude expérimentale.....	75
3-4-1-5-Résultat et discussion.....	76
3-4-1-6-Conclusion.....	78
3-4-2-Méthodes fréquentielles.....	78
3-4-2-1-étude de cas réel.....	78
3-4-2-2-conclusion.....	81
3-5-conclusions générales.....	81
3-6-Bibliographies.....	82
Chapitre IV	
4-Application de l'analyse vibratoire in situ.....	84
4-1-Introduction.....	84
4-2-Présentation de la cimenterie.....	88
4-3-Description du système de surveillance.....	89
4-4-Cinématique du réducteur planétaire.....	90
4-4-1-Matériel utilisé.....	92
4-4-1-1-Collecteur de donnée.....	92
4-4-2-Etude du réducteur planétaire.....	93
4-4-3-Configuration des points de mesure.....	94
4-5-Interprétation et Discussion des résultats.....	96
4-6-Conclusion.....	101
4-7-Bibliographie.....	101
Conclusions et perspectives.....	104
Annexes.....	107

# Introduction

Les mutations techniques et économiques, amplifiées par la mondialisation ont généré d'importants changements dans les entreprises. La production industrielle évolue dans un contexte de plus en plus sévère en ce qui concerne la qualité, la sécurité et les nuisances. Le service de diagnostic et de maintenance dans la logique qualité est confronté à des problèmes de plus en plus complexes (concurrence rude, échange de grandes quantités de données hétérogènes, matériels sophistiqués, etc.). Or, les défaillances qui apparaissent dans les machines tournantes sont rarement décelables visuellement, ou alors il est déjà trop tard pour agir. De ce fait, la résolution nécessite des méthodes spécifiques d'aide à la décision et de nouvelles structures à intégrer dans la stratégie de l'entreprise. C'est pourquoi, l'outil de production doit faire l'objet d'une maintenance efficace. Des pannes catastrophiques inattendues entraînent à la fois une perte de production et des factures de réparations très élevées. Un arrêt de production pour une maintenance sur la chaîne de production d'une cimenterie algérienne peut coûter jusqu'à un milliard de Da/jour. De plus une maintenance mal adaptée à un maillon de la chaîne, peut également conduire à une situation critique, dangereuse aussi bien pour le personnel que pour le matériel et/ou pour l'environnement. De ce fait, la surveillance et le diagnostic des défauts sont aujourd'hui primordiaux pour la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et l'efficacité des systèmes de production ainsi que pour la protection de l'environnement.

Désormais, la maintenance doit s'adapter continuellement au progrès des domaines techniques, technologiques et organisationnels. De plus, la crise existante dans le milieu industriel algérien conduit à des nouvelles implications sur les stratégies des entreprises dans ce domaine. Avec le nouveau contexte industriel (privatisation, économie du marché, etc.), les entreprises subissent de grandes pressions de la parts des clients. Ces derniers deviennent de plus en plus exigeants et demandent, en outre, des produits et des services de bonne qualité, à moindre coût, livrés rapidement et au bon moment et un service après vente défiant la compétition. Donc, pour satisfaire la demande en qualité et en quantité tout en respectant les délais de livraison et les coûts, l'entreprise algérienne doit disposer d'un outil de production

fiable, *donc bien entretenu*. C'est pourquoi, le travail présenté est d'une importance capitale pour l'industrie algérienne et en particulier les cimenteries ou les pannes inattendues entraînent des factures de réparations très élevées, sans compter l'inflation et le retard cumulé dans le secteur de l'habitat et de la construction.

Dans leur majorité, suite à une enquête menée dans les cimenteries de l'est algérien, l'entretien des machines et le remplacement des pièces soumises à usure pouvaient être envisagés de deux manières : l'attente de la casse (maintenance curative) ou le remplacement à intervalles réguliers (maintenance préventive).

L'attente de la casse n'est plus économique et les interventions systématiques sont souvent inutiles, coûteuses en pièces de rechange, main d'œuvre et perte de production, compte tenu des erreurs humaines inévitables, lors des arrêts et des remises en service. Ces interventions peuvent nuire à la fiabilité. Donc, *l'idée est de ne plus combattre les effets, mais de traiter les causes*.

Pour la maîtrise d'une telle idée, ces dernières années, le monde industriel a connu d'important développement dans le domaine de la surveillance et du diagnostic des machines, surtout pour les machines stratégiques ou équipements vitaux, sélectionnés comme critique par leur influence sur la sécurité, sur la qualité et par leur impact sur le flux de production.

L'intérêt de ces systèmes de surveillance est double : détecter une anomalie le plus tôt possible et réaliser un diagnostic plus complet pour en identifier les causes. En surveillant l'apparition de défauts critiques, on peut prévoir les pannes et en minimiser les conséquences : les réparations sont réalisées au moment opportun, elles sont moins coûteuses et les arrêts de production sont limités. Ceci permet de répondre aux impératifs industriels tels que la diminution des coûts de maintenance, la conservation du capital machine, la maîtrise totale de la disponibilité de l'outil de production, de ces coûts d'exploitation, de la qualité des produits fabriqués et la sécurité des équipements, etc. On essaie ainsi d'anticiper les ruptures de pièces qui peuvent endommager la machine ou laisser une partie de la pièce cassée dans la machine. L'exemple souvent cité : les engrenages, universellement répandus en mécanique. L'usure se développe généralement de manière différente sur chacune des dents et la rupture imprévue de l'une d'entre elles peut avoir de graves conséquences sur l'ensemble de l'équipement.

Pour l'utilisateur, ces possibilités nouvelles offrent des diagnostics plus sûrs, plus économiques et plus rapides. Par conséquent, on dispose de machines de plus en plus performantes, avec une fiabilité maximale. C'est pourquoi, la maintenance acquiert une importance croissante et devient une fonction stratégique dans le management des entreprises, permettant ainsi de :

- enrichir et affiner les informations justes et pertinents nécessaires pour la maîtrise des risques ;
- étudier le comportement des matériels pour connaître leur santé et faire des préventions sur leur destin ;
- bien gérer les stocks et rendre les pièces de rechanges disponibles selon les besoins et opérations coûts.

Dans le contexte concurrentiel économique actuel, la réduction des coûts de production est devenu la clé du développement et de la survie de l'entreprise. Hormis, le maintien en condition opérationnelle aux meilleurs coûts d'un outil de production, la réduction des coûts de maintenance et l'augmentation des taux de disponibilité des équipements représentent un levier de productivité, voire de compétitivité. C'est l'enjeu vital pour toute entreprise. Les pannes et les incidents des systèmes de production sont l'un des fléaux majeurs de l'industrie. L'indisponibilité des machines vient amputer lourdement la capacité de production et donc accroître le prix de revient, étant donnée que la machine industrielle est un équipement complexe, sujet à des multiples modes de défaillances ou les opportunités de pannes ou d'incidents sont multiples. Ces derniers sont l'un des fléaux majeurs de l'industrie. Un arrêt de machine non-prévu peut avoir de grandes conséquences financières. L'output de la machine suivante n'est plus assuré, voire le produit fini non plus.

Une panne est souvent très difficile à prévoir. Certains mécanismes sont parfois inutilement compliqués, ce qui les rend très fragiles. Il convient de noter aussi que les insuffisances des machines existantes nécessitent rarement leur remplacement par des matériels plus récents et le problème d'accessibilité des éléments des machines peut aussi être une cause dans la longueur de réparation de certaines pannes. De plus l'impact que peut laisser une fonction cachée dont la défaillance n'est pas évident à l'équipage aux cours des rondes normales des opérateurs. En plus, les techniques d'entretien préventif et d'intervention régulière et systématique bien que coûteuses, ne garantissent pas l'absence de défaillance. Il faut signaler aussi qu'un manque de pièce de rechange à un moment critique peut induire des frais directs et indirects importants, sans compter les erreurs humaines inévitables lors des arrêts et des remises en service.

En conséquence, pour faire face à ces nouveaux enjeux, la maintenance doit faire appel à des techniques d'investigation modernes très spécifiques, éloigner de la culture de la maintenance traditionnelle. En effet, la surveillance était destinée à assurer la protection d'une machine en déclenchant automatiquement son arrêt avant que ne surviennent des dégradations graves. Contemporain, elle doit permettre de détecter à un stade précoce



l'existence d'un défaut, d'en identifier la nature, d'en déterminer la gravité et d'en suivre l'évolution. Ainsi, les informations fournies doivent permettre la planification des arrêts préventifs pour remise en état au meilleur moment. La surveillance devient ainsi la technique d'investigation sur laquelle repose les maintenances conditionnelle et prévisionnelle. C'est pourquoi la mise en place d'un programme de maintenance efficace, qui permet de répondre à un tel défi, doit réellement être une volonté de toute entreprise. Cette gestion s'oriente vers la participation de tous les intervenants et à tous les niveaux [1]. Elle prône également l'amélioration continue et suggère des outils et des méthodes de plus en plus évolués.

L'expérience a montré, que parmi les différents phénomènes physiques utilisés pour mettre en évidence des défauts de fonctionnement ou de dégradation d'une machine tournante et donnant une meilleure mesure de son état, l'analyse vibratoire est la plus usitée en maintenance conditionnelle [2]. Ces vibrations sont caractéristiques de l'état de l'équipement et constituent sa signature vibratoire. Le prélèvement et le traitement de tout ou une partie de cette signature permet de connaître rapidement l'état de l'équipement et de suivre son évolution dans le temps sans effectuer le démontage de la machine. Ce qui nous permettrons de faire la corrélation entre le fonctionnement des principaux organes et les signaux prélevés d'une part et de mettre en évidence la précocité de l'information vibratoire par rapport aux autres informations habituellement recueillies sur une machine d'autre part. Donc, Les vibrations fournissent des paramètres fondamentaux permettant la détection précoce des causes de défaillance et ainsi définir l'organe défectueux sans démontage de la machine. Par conséquent, la correction éventuelle et la programmation des opérations de maintenance seront limitées aux seuls maillons et organes défaillants.

Donc, notre objectif est de garantir la disponibilité des machines en diminuant au maximum les dépenses liées aux achats et opérations d'entretien, tout en mettant en place un système efficace de gestion de maintenance. Un système de maintenance adéquat au système de production d'une entreprise doit à la fois satisfaire les critères techniques, maximiser l'impact stratégique et optimiser les critères économiques. En effet, l'utilisation des méthodes de traitement de signal émis par les machines de production ou certains organes de ces machines, nous permettent d'extraire des informations pertinentes et ainsi prévoir l'apparition des dysfonctionnements et l'intervention à bon escient, en suivant l'évolution dans le temps des symptômes de dérive d'état de l'équipement en cours d'exploitation, voire définir les améliorations nécessaires par une nouvelle conception [3].

Dans ce contexte, et étant donné que le signal vibratoire contient la signature cinématique de la machine, liée aux conditions de fonctionnement : l'identité de la machine,

et en utilisant ce signal, nous proposons une méthode d'évaluation des systèmes de production en intégrant les défaillances et les politiques de maintenance.

Le travail est organisé en quatre parties. Une introduction comprenant la mission et les objectifs de la recherche. Après avoir résumé les fonctions de la maintenance par rapport à la fonction production, le rôle de la maintenance dans les différents secteurs, les paramètres essentiels de cette fonction, les principaux domaines d'action et les politiques de maintenance dans le chapitre I. Nous développons la maintenance conditionnelle en utilisant l'analyse vibratoire dans le deuxième chapitre, la présentation des éléments de la maintenance qui doivent être pris en compte dans l'étude, le concept de l'analyse vibratoire, les indicateurs utilisés. Nous mettons en application dans le troisième et quatrième chapitre l'analyse vibratoire pour la gestion de la maintenance des éléments spécifiques de l'industrie des ciments. Comme éléments incontournables pour les machines tournantes, nous avons considéré les roulements. Un dispositif expérimental a été conçu pour mettre en évidence la détection précoce de la détérioration des roulements au laboratoire et l'étude in situ d'un roulement (type 24060c), en utilisant l'analyse fréquentielle et la théorie d'enveloppe. Au chapitre quatre, et afin d'optimiser les actions de la maintenance, tout en tenant compte de la sûreté de fonctionnement et en utilisant la MBF, nous avons développé une méthodologie de gestion de la fonction maintenance avec une application dans la cimenterie Hamma bouziane.

Finalement, nous terminons ce travail par une conclusion générale et des recommandations destinées aux services de maintenance des entreprises et sociétés industrielles algériennes.

# Chapitre 2

## Présentation de l'analyse vibratoire

### 2. 1. Introduction

Toute machine possédant des composantes en mouvement génère un certain niveau de vibration, images des efforts dynamiques, quel que soit le soin apporté à leur fabrication. De ce fait, toute modification du processus dynamique de la machine engendre une variation des énergies vibratoires. Ces vibrations sont stable si la machine fonctionne normalement, quantifiable et reproductible, si l'environnement est le même. Ces vibrations sont caractéristiques de l'état de fonctionnement de l'équipement et constituent sa signature cinématique [1,2]. Au fur et à mesure que l'état de la machine se détériore, le niveau vibratoire augmente et change radicalement avec l'apparition d'un défaut, première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle de dégradation et de panne. Les vibrations sont le résultat d'un ensemble d'efforts exercé par la machine elle même ou le résultat de l'interaction avec l'environnement dans lequel la machine est intégrée. On peut distinguer des efforts d'origine mécanique (balourd, désalignement, roulement, engrènement, etc.), d'origine électrique (vibrations de stator, transformateurs, etc.), d'origine hydraulique (cavitation, turbulences, pulsations de pression, etc.) et de réponse du milieu (broutement des machines outils, pompage des compresseurs, etc.).

Aujourd'hui, l'emploi des technologies intégrant les méthodes avancées de traitement de signal, ont permis le développement d'une nouvelle forme de maintenance couramment appelée maintenance conditionnelle dont son emploi occupe une place privilégiée pour faire

un diagnostic d'un équipement mécanique. A l'image de la médecine, l'analyse vibratoire permet l'élaboration d'un « bilan mécanique » complet du système, qui caractérise qualitativement et quantitativement son état à un instant donné, et ainsi d'y reconnaître d'éventuelles « maladies » [3].

Ces caractéristiques font de la surveillance par analyse vibratoire, un outil indispensable pour une maintenance moderne, puisqu'elle permet d'améliorer la disponibilité et la sécurité par la détection précoce et le suivi de la dégradation des éléments critiques, ainsi localiser l'organe défectueux sans démontage de la machine. Par conséquent, la correction éventuelle et la programmation des opérations de maintenance seront limitées aux seuls maillons et organes défaillants, si possible pendant les arrêts programmés de la production ou en la perturbant le moins possible, tout en tenant compte de la disponibilité de l'équipe d'intervention et de l'approvisionnement des pièces de rechange.

Le signal vibratoire est l'identité de la machine, il contient la signature cinématique de la machine reliée aux conditions de fonctionnement, un petit changement dans le signal vibratoire donne un autre comportement de l'état de fonctionnement de l'équipement. Aujourd'hui, et avec le développement des études sur la pathologie des machines, les effets vibratoires observés peuvent être reliés aux causes matérielles qui les génèrent (tableau1). La plus part des défauts fait augmenter le niveau vibratoire, ce qui peut engendrer des pertes de précision des machines et des dommages secondaires [4, 5]. De plus, un équipement qui ne fonctionne pas rondement se détériore plus rapidement, peut entraîner le bris d'équipement se trouvant à proximité et génère beaucoup plus de bruit. Les vibrations créent de la fatigue, provoquent l'usure prématurée des pièces et elles sont souvent à l'origine de la rupture des éléments de la machine (diminution de la précision, diminution de la fiabilité de fonctionnement et diminution de la durée de service). C'est pourquoi pendant son exploitation, l'équipement doit satisfaire aux moins aux deux exigences suivantes :

- Il doit être vibro-stable (c'est à dire qu'il peut fonctionner sous l'influence des vibrations et du choc avec la précision donnée par les normes et les instructions techniques) ;
- Il doit être vibro-résistant (c'est à dire que pendant toute la durée d'exploitation, les contraintes admissibles seront supérieures aux contraintes produites par les vibrations et le choc).

Les relevés de vibrations sont les meilleurs outils pour obtenir un diagnostic précis sur les problèmes de dysfonctionnement des équipements [6, 7, 8, 9]. Le principe de l'analyse des vibrations réside dans le fait que toute machine fonctionnant dans des conditions de travaux

normaux vibre et émet des vibrations dont les paramètres sont dus à ses caractéristiques cinématiques et au travail accompli. Ces vibrations évoluent en fonction de l'état de santé des organes de la machine dont les fréquences sont identiques à celles des efforts qui les ont provoqués. De plus, si l'on possède la « signature » vibratoire de la machine lorsqu'elle était neuve, ou réputée en bon état de fonctionnement, on pourra, par comparaison, apprécier l'évolution de son état ou déceler l'apparition d'efforts dynamiques nouveaux consécutifs à une dégradation en cours de développement. Il suffit donc en principe de mesurer l'évolution de ses vibrations, et en fonction de ses caractéristiques déceler les anomalies. La mesure globale prise en un point est la somme des réponses vibratoires de la structure aux différents efforts excitateurs. Pour collecter les données nécessaires à la mesure et à l'analyse, on fait appel aux capteurs placés en des points particuliers dont le rôle est de transformer l'énergie mécanique dispensée par la machine en un signal électrique proportionnel mesurable de manière reproductible.

## 2.2. Les applications industrielles

Les applications industrielles de la surveillance vibratoire des équipements en fonctionnement sont diversifiées, que ce soit pour des structures mécaniques complexes (plate - formes, pont, barrages, bâtiments,...) ou les machines (turbo - alternateurs, système d'engrenage,...) ou certains organes des machines de productions (roulements, pignons, rotors, ...etc.) contenant la signature cinématique de la machine, reliée aux conditions de fonctionnement.

Les techniques de l'analyse vibratoire, permettent à tout industriel qui les met en application :

• de connaître à tout moment « l'état de santé » de ces machines et d'estimer la longévité potentielle des différents composants et ainsi prévenir l'usure prématurée des différentes pièces :

- Pour un équipement neuf, l'analyse vibratoire permet la détection d'anomalies ou défauts de montage - sources potentielles de pannes- pratiquement indécélables par d'autres techniques d'investigation ;

- Pour un équipement venant de faire l'objet d'une remise en état, l'analyse vibratoire vérifie si cette opération a bien corrigé les anomalies identifiées ayant conduit à la prise de décision d'arrêt ou, au contraire, a généré un autre comportement anormal susceptible d'induire, à brève échéance, une nouvelle panne (maintenance mal adaptée).

Ü d'en déduire l'évolution de l'état de santé pour les semaines ou les mois à venir et de faire des prévisions sur leur destin : faire un bilan de santé ;

Ü d'enrichir et affiner les informations juste et pertinentes nécessaires pour la maîtrise des risques ;

Ü d'évaluer avec précision le niveau de vibration aux endroits envisagés pour l'utilisation d'équipements sensibles et ainsi évaluer l'emplacement idéal d'un équipement requérant de faibles niveaux vibratoires ;

Ü Améliorer l'environnement de travail.

Les avantages suivants peuvent être perçus :

Ü éviter la casse des machines (vrais pour plus de 90 des cas) ;

Ü éviter les arrêts de production non programmés ;

Ü augmenter la durée de vie des équipements ;

Ü assurer un contrôle qualité permanent de réparation, du montage et du graissage ;

Ü pratiquer l'équilibrage in situ de ces équipements ;

Ü augmenter la sécurité dans les secteurs d'activités tels que le pétrole, la pétrochimie et la chimie ;

Ü éviter les erreurs humaines, lors des arrêts et des remises en état ;

Ü améliorer la disponibilité des équipements et la sécurité de l'environnement.

Ce pendant, Il faut remarquer que les méthodes et les résultats dans le domaine de l'analyse vibratoire intéressent directement la production industrielle (chaîne de fabrication, la production d'énergie et la motorisation).

### **2. 3. Notions fondamentales**

Tout corps en mouvement est sujet à des vibrations. Ces vibrations sont des mouvements en principe normaux. Dans un mouvement de rotation, il existe deux corps. Le premier est fixe, c'est la partie statorique, le deuxième mobile, la partie rotorique. En mouvement, tout point de ces deux corps occupe un espace tridimensionnel bien défini. Or, Les vibrations d'une machine peuvent être considérées comme une manifestation extérieure des forces internes. Donc, Elles ne sont que le résultat des forces émises par les différents éléments de la machine pondérées par la fonction de transfert des liaisons (roulements, film d'huile, engrenages,...etc.) : C'est la réponse de la structure à l'excitation des forces internes et externes, figure 2.1 et l'analyse de leurs signaux donne des informations sur les processus de dégradations internes de la machine.

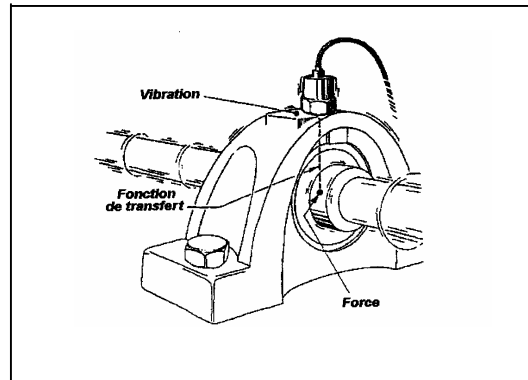


Figure 2.1 : mesure d'une vibration.

$$\text{Vibrations} = \text{Force} \times \text{Mobilité.}$$

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

**1<sup>er</sup> groupe** « caractéristique de la structure », il regroupe :

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

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

**2<sup>em</sup> groupe** « caractéristique de l'outillage utilisé », il regroupe :

- Position et fixation du capteur sur la machine ;
- Caractéristiques du capteur ;
- Pré amplification et transmission du signal ;
- Performance de l'appareillage utilisé.

Ces paramètres concernent les caractéristiques de la chaîne de mesure que l'on doit s'efforcer de rendre invariable d'une mesure à l'autre afin de pouvoir avoir de bons résultats.

**3<sup>em</sup> groupe** « caractéristique des efforts dynamiques », il regroupe :

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

Il faut remarquer que les éléments de la 3<sup>em</sup> groupe sont en fait ceux qui sont directement liés à l'intensité des efforts dynamiques qui font naître la vibration. Cependant, il

est impossible de les mesurer directement sans passer par l'amplification inévitable des paramètres des groupes 1 et 2. Il convient donc de garder à l'esprit que les techniques d'analyses des vibrations ne donnent pas l'intensité intrinsèque d'une force parasite, révélatrice d'un défaut, mais permettent d'en suivre l'évolution. C'est pourquoi, il est plus facile d'effectuer un diagnostic en regardant l'évolution dans le temps des mesures relevées, que de s'attacher à l'étude d'une mesure isolée, très difficile à interpréter.

## **2.3. Généralités**

### **2.3.1. Définition théorique d'une vibration**

Une vibration est une oscillation ou la quantité est un paramètre définissant le mouvement d'un système mécanique.

Une oscillation est une variation, normalement dans le temps, de la magnitude d'une quantité en regard d'une référence spécifiée, lorsque cette magnitude est alternativement plus grande ou plus petite que la référence.

L'organisation Internationale de Normalisation (ISO) a édité en Août 1990 une révision de la norme ISO 2041, définissant la notion de vibration : Une vibration est une variation avec le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique lorsque l'intensité est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence. En effet, un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence. Les différents éléments de la machine vibrent à des fréquences et des amplitudes différentes. C'est pourquoi une vibration se caractérise principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature.

### **2.3.2. Description d'un signal vibratoire**

Généralement, une vibration est caractérisée principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature, figure 2.2.



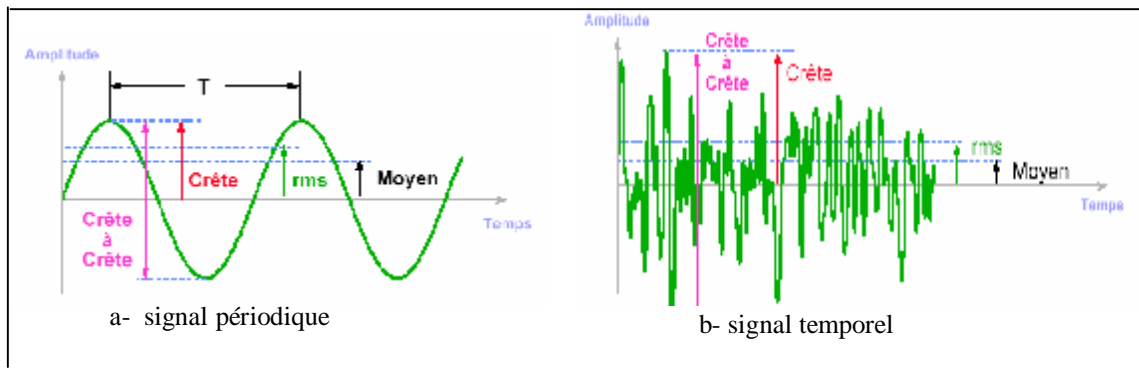


Figure 2.2 : Description du signal vibratoire

- La valeur maximale  $X_c$  (crête) : c'est la plus grande valeur atteinte qui ne prend pas en compte l'évolution de la vibration en fonction du temps. Elle est rarement utilisée ;
- La valeur crête à crête  $X_{cc}$  (crête à crête) : c'est la différence entre la plus grande valeur du signal et sa plus petite valeur ;
- La valeur moyenne absolue  $X_{moy}$  : c'est la moyenne du signal redressé sur une période ; elle est peu utilisée car elle n'est pas reliée directement à une grandeur physique,

$$X_{moyenne} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (2.1)$$

- La valeur efficace RMS (Root Mean Square) : c'est l'image de l'énergie contenue dans un signal. Elle est exprimée en unité physique (m/s<sup>2</sup>, m/s, m ou g pour les vibrations par exemple). Elle est très bien adaptée pour les composantes déterministes du spectre (raies pures). La valeur efficace se détermine par la formule suivante :

$$\text{Valeur efficace(RMS)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt} ; \quad (2.2)$$

Le facteur de crête : ce facteur est défini par la relation :

$$F_c = X_c / \text{RMS}. \quad (2.3)$$

C'est un indicateur sans dimension.

Il faut remarquer que l'amplitude nous renseigne sur l'importance du défaut surveillé, alors que la fréquence nous renseigne sur son origine.

### 2.4.1. Signaux

On désigne, sous ce vocable très général, toute grandeur pouvant avoir un effet sur une structure pour modifier son équilibre ou son comportement : force, tension, accélération, vitesse, pression acoustique, etc. Les vibrations mécaniques sont des mouvements oscillant

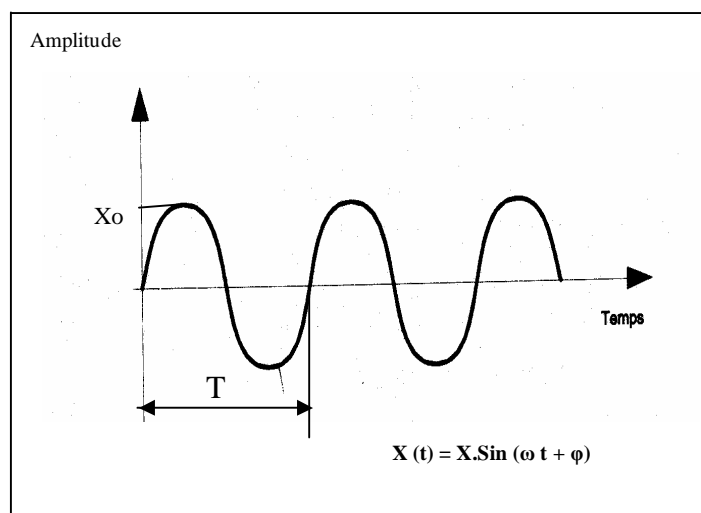
autour d'une position moyenne d'équilibre. Ces mouvements oscillants caractéristiques de l'effort qui les génère, peuvent être, soit périodiques, soit apériodiques (transitoires ou aléatoires) selon qu'ils se répètent ou non, identiquement à eux-mêmes après une durée déterminée.

D'une manière générale, les différents signaux peuvent être classés dans l'une des catégories suivantes :

### a) Signaux harmoniques

Les vibrations périodiques peuvent correspondre à un mouvement sinusoïdal pur comme celui d'un diapason où, plus généralement, à un mouvement complexe périodique que l'on peut décomposer en une somme de mouvements sinusoïdaux élémentaires, plus faciles à analyser. Les mouvements sinusoïdaux élémentaires sont appelés « composantes harmoniques » et leurs fréquences sont des multiples entiers de la fréquence du mouvement étudié qui est appelée « fréquence fondamentale » ou fréquence de l'harmonique d'ordre 1.

Donc, une vibration harmonique est une vibration dont le diagramme *amplitude-temps* est représenté par une sinusoïde (Figure 2-3). Le meilleur exemple d'une vibration harmonique est celle générée par le balourd d'un rotor en mouvement.



**Figure 2.3 : Représentation d'un signal harmonique**

Où  $\omega$  : Vitesse angulaire ou pulsation du mouvement ( $2\pi f$ ), exprimée en rad/s ( $\omega = 2\pi f$ ).

$f$  : fréquence du mouvement (Hertz), c'est la cadence du phénomène ( $f = 1/T$ ).

$\varphi$  : phase du mouvement par rapport à un repère dans le temps.

### b) Signaux périodiques non harmoniques

Une vibration périodique est une vibration qui se produit exactement après un certain temps, appelée période, figure 2.4. Cette vibration est créée par une excitation elle même périodique. C'est le cas le plus fréquent rencontré sur les machines tournantes. Ce type de vibration est composé de plusieurs vibrations harmoniques. Donc, un signal périodique non harmonique est une somme de signaux harmoniques de différentes amplitudes maximales (constantes) mais dont les pulsations sont multiples d'une pulsation dite fondamentale, comme l'illustre la Figure 2-4. Le signal est connu à l'instant  $t$  et se retrouve rigoureusement identique à l'instant  $t \pm nT$  ( $n$  étant un nombre entier).

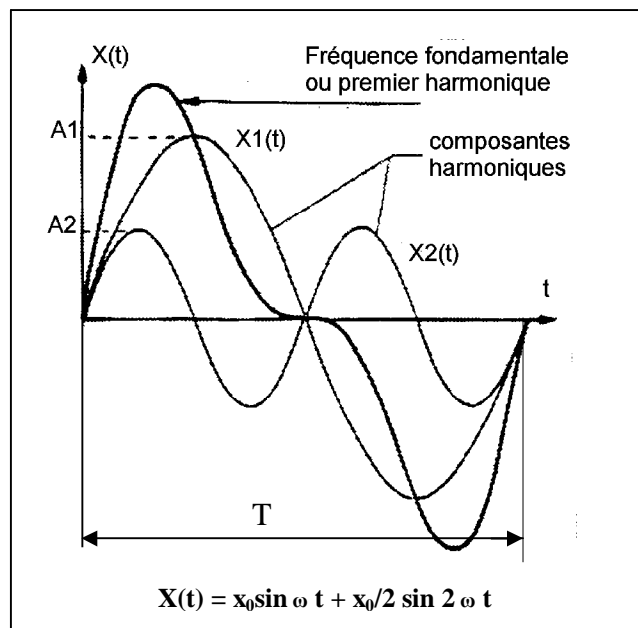


Figure 2-4 : Représentation d'un signal périodique non harmonique (en trait fort) et ses deux composantes harmoniques (en trait fin).

### c) Signaux transitoires et aléatoires

Une vibration apériodique est une vibration dont le comportement temporel est quelconque. Dans une telle situation, on n'observe jamais la reproductibilité dans le temps, figure 2.5. C'est pourquoi, les vibrations aléatoires ne peuvent être représentées mathématiquement que par une série de relations de probabilités car il faudrait théoriquement un temps infini pour les analyser, mais on peut considérer que la fonction aléatoire est une fonction périodique dont la périodicité est égale à l'infini et que cette fonction est constituée d'une infinité de fonctions sinusoïdales dont la fréquence varie de façon continue. C'est le cas de chocs que l'on enregistre par exemple sur un broyeur. La figure 2-5 montre deux exemples de signaux non périodiques. Un signal transitoire (à gauche) se produit pendant un intervalle

de temps limité. Les signaux aléatoires ont leurs caractéristiques d'amplitudes et de fréquences qui changent aléatoirement en fonction du temps. Ces vibrations caractéristiques sont donc toutes identifiables et mesurables. La tendance à l'accroissement de leur intensité est représentative de l'évolution de l'effort qui les génère et révélatrice du défaut qui se développe.

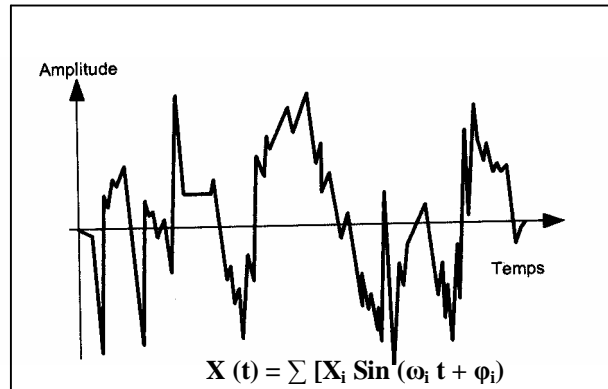


Figure 2.5 : Représentation d'un signal aléatoires

## 2.5. Signatures vibratoires

Les signatures vibratoires sont adaptées à la détection d'anomalies affectant des ensembles mécaniques dont les éléments structuraux sont soumis à des efforts mécaniques dynamiques se traduisant par des vibrations mécaniques. L'analyse vibratoire détecte les mouvements répétitifs d'une surface appartenant à un matériel mécanique dynamique (machines tournantes, machines alternatives, etc.) ou à un matériel statique (structure, tuyauteries, etc.). Le mouvement vibratoire lié à une anomalie mécanique peut se classer en trois catégories. Pour la majorité des défauts mécaniques rencontrés sur les machines tournantes, les vibrations sont de nature périodique et se répètent de façon identique au cours du temps. Pour des défauts qui se traduisent par des chocs sur des structures, les vibrations seront caractérisées par des signaux transitoires de faible durée qui sont de nature répétitive ou aléatoire. Enfin il est possible de rencontrer des vibrations ayant un caractère aléatoire au cours du temps (exemple de la cavitation de pompe).

Essentiellement, les mouvements caractérisés par des vibrations sont appréciés par des amplitudes et des fréquences, c'est pourquoi l'interprétation des signaux vibratoires fait appel à l'analyse temporelle et à l'analyse fréquentielle utilisant le plus souvent la transformée de Fourier. Le principe de l'analyse fréquentielle des vibrations revient à considérer le signal vibratoire comme une somme de fonctions sinusoïdales dont les valeurs de fréquences sont des multiples entiers d'une fréquence appelée fréquence fondamentale. En l'absence de

défauts, les différentes fréquences contenues dans le signal sont directement liées à la géométrie et à la vitesse de rotation de l'élément mécanique.

La présence d'un ou plusieurs défauts se traduisent par l'apparition de nouvelles fréquences que les experts sont souvent capables d'interpréter, si la mesure de vibration est faite au voisinage direct du défaut. En revanche, si le point de mesure est éloigné de la source initiale, la contribution parasite de nombreuses sources de vibrations qui se propagent dans les structures mécaniques et qui vient masquer le signal utile, rend extrêmement complexe l'interprétation des signaux vibratoires. Le traitement des signaux industriels conduit toujours à des spectres représentés par des courbes continues comprenant de nombreux pics. La présence de pics indique que le signal contient des composantes périodiques. Le fond continu est du à la présence de bruit ou d'informations déterministes non périodiques. Grâce aux outils modernes de la simulation en mécanique vibratoire et à leurs validations avec des essais réels, il est possible, connaissant la vitesse de rotation d'une machine, d'interpréter physiquement les pics relevés pour tous les harmoniques [10]. Il faut souligner que l'établissement et l'analyse des signatures initiales constituent la fondation sur laquelle repose la fiabilité de la surveillance et des diagnostics ultérieurs. L'opération se déroule en trois phases distinctes : la prise de mesures, le diagnostic, l'optimisation des indicateurs de surveillance et des seuils et gabarits d'alarme.

## 2.4.2. Représentations des signaux

### a) Analyse harmonique, série de Fourier

Physiquement, les signaux sont enregistrés sous la forme de la variation d'un paramètre (force, contrainte, amplitude, accélération, tension, pression, etc.) en fonction du temps. Or il est souvent plus facile de caractériser un signal dans le domaine fréquentiel. Cette représentation est obtenue grâce au théorème de Fourier qui démontre que toute fonction périodique  $f(t)$  de période  $T$ , peut se représenter par la somme d'une série de fonctions sinusoïdales de périodes  $T, T/2, \dots, T/k \dots$  que l'on appelle série de Fourier que l'on peut écrire sous la forme d'un développement :

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(2\pi kt/T) + b_k \sin(2\pi kt/T) \quad (2.4)$$

Où les coefficients  $a_0, a_k$  et  $b_k$  ont les expressions suivantes :

$$a_0 = \int_0^T 1/T f(t) dt \tag{2.5}$$

$$a_k = \int_0^T 2/T f(t) \cos(2\pi kt/T) dt \tag{2.6}$$

$$b_k = \int_0^T 2/T f(t) \sin(2\pi kt/T) dt \tag{2.7}$$

L'ensemble des valeurs des coefficients  $a_k$  et  $b_k$  forme le spectre de fréquences de la fonction  $f(t)$ . Un formalisme plus simple est possible en utilisant des fonctions exponentielles imaginaires, à savoir :

$$f(t) = \sum_{k=-x}^x c_k \exp(2i\pi kt/T) \tag{2.8}$$

$$c_k = 1/T \int_0^T f(t) \exp(-2i\pi kt/T) dt \tag{2.9}$$

Dans la pratique, cela veut dire que l'on peut décomposer notre fonction comme une somme de sinus (cosinus) de périodes multiples de la période de base de notre fonction. Les coefficients représentent ainsi les niveaux « énergétique de chacune des fréquences élémentaires ». L'application principale de l'analyse FFT est donc la mise en évidence des périodicités du signal et le calcul de l'énergie contenue dans le signal pour chacune des fréquences.

**b) Transformée de Fourier**

La notion de transformée de Fourier peut être étendue à des fonctions non périodiques (aléatoire par exemple). La fréquence  $1/T$  du terme fondamental tend alors vers 0, et les fréquences des différents harmoniques se rapprochent pour donner à la limite une fonction continue de la variable  $F=1/T$ . La fonction  $f(t)$  n'est plus représentée par une somme de composantes de fréquences discrètes, mais par une intégrale sur toutes les valeurs des fréquences  $F(v)$  [4] :

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(V) \exp(2i\pi vt) dt \tag{2.10}$$

Remarques :  $F(v)$ , spectre de  $f(t)$ , est appelé **transformée de Fourier** de la fonction  $f(t)$ . L'énorme avantage est que  $F(v)$  peut se déduire de  $f(t)$  par une expression comparable et qui donne les valeurs de  $C_k$  lorsque  $f(t)$  est périodique

$$F(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \exp(-2ipvt) dt \quad (2.11)$$

On remarquera la symétrie des deux expressions et on appellera la fonction  $f(t)$ , la **transformée de Fourier inverse** de  $F(v)$ . C'est entre autre grâce à cette propriété que les calculs de transformées de Fourier sont très utiles en traitement numérique d'un signal. Les appareils de mesures utilisés pour faire une analyse vibratoire utilisent ces propriétés pour déterminer les caractéristiques d'un signal mesuré. Ainsi, l'analyse FFT sert à observer des signaux qui ne sont pas périodiques. Il faut remarquer que cette extension de capacité du calcul FFT, qui n'est pas naturelle pour ce type de signal, appelle à la plus grande prudence dans l'interprétation des résultats. En conclusion, l'analyse FFT est utilisée pour la description du signal temporel dans le domaine fréquentiel avec une résolution fréquentielle constante sur une échelle linéaire de fréquence. La résolution peut être très fine pour chercher avec précision les composantes périodiques des signaux vibratoires.

### 2-5. Les analyseurs de spectres

Les analyseurs de spectres permettent la visualisation du signal en fonction de la fréquence. Les analyseurs réalisent la décomposition du signal en fonction de la fréquence en appliquant un traitement spécifique. Ils fonctionnent selon le principe suivant :

- Le signal électrique issu du capteur de vibrations est amplifié et filtré ;
- Le signal analogique est échantillonné et transformé en une suite de valeurs numériques représentatives (conversion analogique/numérique) ;
- Il réalise un calcul de transformée de Fourier rapide (en anglais Fast Fourier Transform, FFT) ;
- Un afficheur indique le résultat

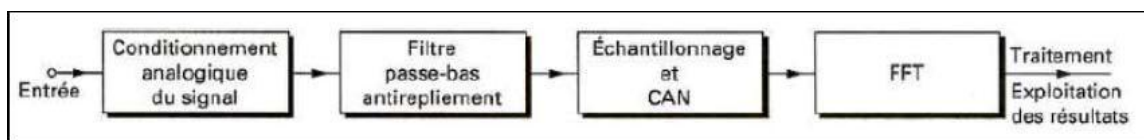


Figure 25 - schéma de principe d'un analyseur FFT

#### 2-5-2. Résolution

Il est absolument nécessaire de connaître les relations qui existent entre la fréquence d'échantillonnage, le nombre d'échantillons, la gamme de fréquence, le nombre de lignes de calcul et la résolution. La gamme de fréquence commence théoriquement à 0Hz et dépend de

la fréquence d'échantillonnage qui détermine la fréquence maximale d'analyse :

$$F_{\max} = f_e/2,56 \quad (2.12)$$

Le nombre de ligne de calcul (n) dépend du nombre d'échantillons stockés (N) et respecte la même règle que précédemment :

$$n = N/2,56 \quad (2.13)$$

Il faut remarquer qu'il existe deux types de transformée de Fourier. La transformée de Fourier Discrète (DFT) et la transformée de Fourier Rapide (TFR). L'utilisation de la seconde revient à la diminution des opérations de calcul par rapport à la première. Or, N étant le nombre d'échantillons, le nombre de multiplications à effectuer est de  $N^2$  dans le premier cas, alors, il n'est que de  $N \log_2 N$  dans la seconde.

Pour ce qui concerne la résolution, elle est définie par rapport entre la fréquence d'échantillonnage et le nombre d'échantillons, à savoir :

$$\Delta f = f_e/N = f_{\max}/n \quad (2.14)$$

## 2.6. Détection et diagnostic des pannes

L'objectif du diagnostic consiste à rechercher la (les) cause(s) ayant entraîné une situation anormale. Le diagnostic des situations anormales dans une machines ou équipement consiste à déterminer quel est l'élément qui par sa défaillance, a conduit à la détection d'un symptôme de dysfonctionnement. Ce dysfonctionnement peut être une panne ayant entraîné un arrêt ou une dérive de production non forcément décelable. Donc, pour effectuer un diagnostic, il faut disposer d'informations significatives, qui permettent de reconnaître les défauts. Ce qui revient à établir une relation entre des informations dégagées d'un traitement des signaux qui représentent les états d'une machine - en particulier ses états vibratoires - et une certaine connaissance de ces comportements (phénomène physique et sa représentation), [11], étant donné que le diagnostic vibratoire se base sur l'identification du phénomène mécanique à la fréquence de la vibration qu'il génère [12]. Cet acte de recette permet d'établir la signature vibratoire de l'équipement, véritable carte génétique sur laquelle reposeront sa surveillance et les diagnostics ultérieurs de recherche de causes de dysfonctionnement et constitue pour l'exploitant et le maître d'ouvrage une garantie de bon fonctionnement. Ces tâches regroupent :

- la localisation de la défaillance (circonscription de la défaillance) ;
- et l'identification (détermination des fonctions initiatrices qui sont à l'origine de la défaillance) [13].



La physique des phénomènes est approchée par l'observation, le mesurage et le traitement des signaux. En effet, Il ne peut y avoir diagnostic, si l'on sait ce qu'est une maladie, c'est-à-dire dans notre cas si l'on ne connaît pas les défauts des machines. C'est pourquoi, la première démarche d'une action de surveillance, c'est de sélectionner quels sont les incidents dangereux, coûteux et les plus fréquemment rencontrés sur les machines [8], par exploitation des historiques et comment ils se manifestent (quelle est leur signature). Ce sera généralement des défaillances par dégradation, donc détectables. Si la machine est mal connue, une étude AMDEC (analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leurs criticités) permettra d'identifier les pannes probables, graves et détectables. En effet, toutes les machines en fonctionnement vibrent et le spectre des fréquences de leurs vibrations en état de fonctionnement a un profil particulier. Mais dès que les phénomènes d'usure, de fatigue, de vieillissement, de casse apparaissent, le profil de ce spectre change, voire naissance des forces internes variables dans le temps et de différentes natures. Ces forces dépendent de l'état de fonctionnement des machines, et sont :

- Forces impulsionnelles (chocs) ;
- Forces transitoires (variation de charge) ;
- Forces périodiques (balourd) ;
- Forces aléatoires (frottements).

Ces forces sont transmises par les différentes composantes de la machine et induisent des déformations de la surface de la structure, figure 2.6. Leurs caractères, essentiellement permanentes ou transitoires, sont liés aux caractères des causes qui les provoquent. Les mesures de ces vibrations permettent de dégager des descripteurs par lesquels peuvent être suivi en temps réel, le comportement, l'état et l'évolution de dégradation de composants mobiles. Ces descripteurs ont un rôle vital dans le bon fonctionnement des machines tournantes. De ce fait, la quantification et la qualification de ces vibrations sont devenues des moyens privilégiés pour une maintenance conditionnelle, étant donné, que chaque élément cinématique a une fréquence caractéristique de l'état de fonctionnement et de défaut. Cette démarche sera d'autant plus simple que les bons choix seront faits rapidement. L'expérience acquise sur les machines tournantes a conduit à classer les défauts les plus fréquemment rencontrés (voir annexe1, tableau 2), [14].

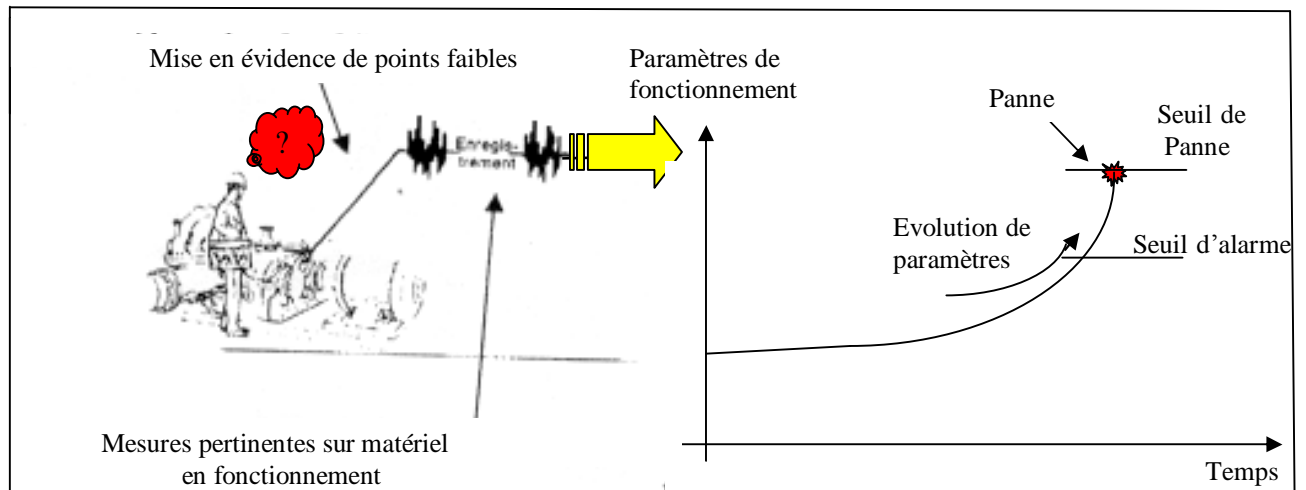


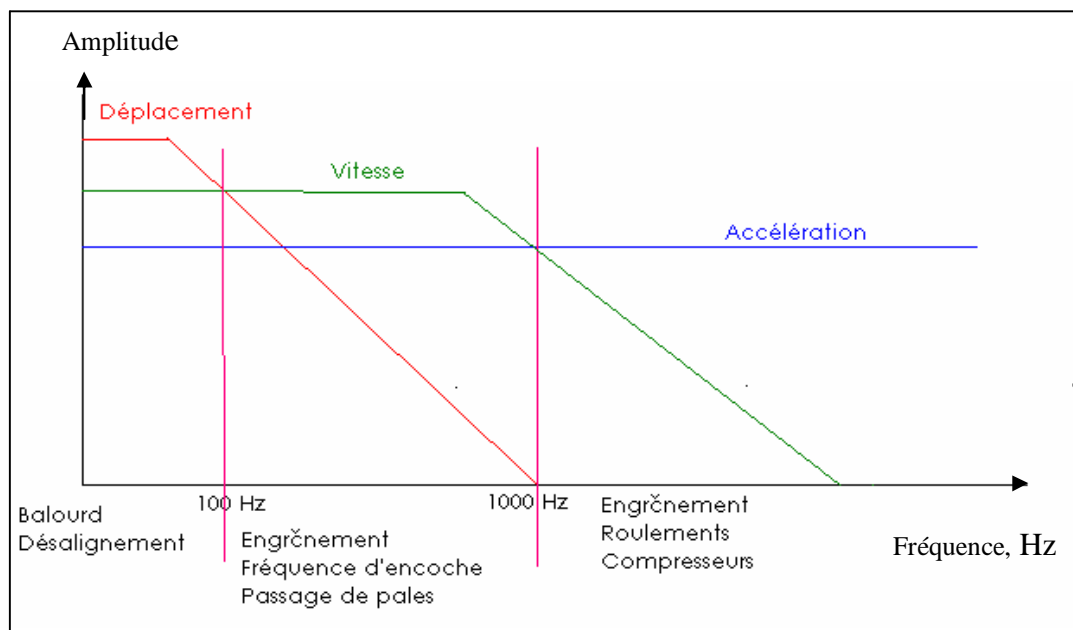
Figure2.7 : Principe de l'analyse vibratoire des machines tournantes.

## 2.7. Grandeurs physiques caractérisant une vibration

En industrie, Les états vibratoires sont rarement repérés par les mesures des forces, mais plus classiquement par des descripteurs associés aux déplacements, aux vitesses (variation du déplacement par unité de temps) ou aux accélérations (variation de la vitesse par unité de temps). Les vibrations ressenties ou mesurées sur un équipement ne sont en fait que la réponse de la structure à la somme des excitations internes et externes. Ces vibrations sont pressenties par des capteurs au point de mesure. Le descripteur retenu pour la mesure dépend de la nature des problèmes recherchés, de l'accessibilité des points de mesures et des technologies utilisés [15]. Les relations entre ces trois paramètres ( $x$ ,  $v$ ,  $\gamma$ ) mettent en lumière, l'importance du choix de la grandeur physique à mesurer pour la surveillance d'une machine tournante. Les paramètres à mesurer dépendront de la fréquence du phénomène à étudier, figure2.7. La grandeur retenue pour la mesure est appelée paramètre ou indicateur de surveillance. Les capteurs associés à ces paramètres transforment la vibration mécanique en un signal électrique : capteur de proximité, capteur de vitesse et capteur d'accélération. Il faut remarque que la perception de l'énergie vibratoire est différente d'un point à un autre, par conséquent, la réponse vibratoire est différente selon l'endroit où elle est prélevée. Ainsi, par rapport à une mesure effectuée en mode vitesse, la mesure en mode déplacement aura pour effet d'atténuer toutes les composantes moyennes et hautes fréquences et d'amplifier les composantes basses fréquences, en revanche, la mesure en mode accélération aura pour effet d'atténuer les composantes basses fréquences et d'amplifier les composantes hautes fréquences.

Un phénomène vibratoire induit par un phénomène donné se traduira par un déplacement significatif si sa fréquence est faible. Il faut remarquer qu'avec l'augmentation de la fréquence, le déplacement diminue, étant donné que ce dernier est inversement proportionnel au carré de la fréquence. C'est la raison pour laquelle la mesure en mode déplacement n'est généralement utilisée que pour mettre en évidence des phénomènes basses fréquences ( $f \leq 100$  Hz) ou dont les composantes prépondérantes se situent à 1 ou 2 fois la fréquence de rotation (déséquilibre, déformation, désalignement, desserrage,.....).

La mesure en mode vitesse permet d'observer correctement les phénomènes dont la fréquence n'est pas trop élevée, c'est à dire ne dépassant pas 1000 Hz (passage de pales d'un ventilateurs ou d'une pompe, engrènement sur réducteur, défauts de roulements dans le cas d'écaillage localisés,...) et bien évidemment les défauts des lignes d'arbres (déséquilibre, désalignement, déformation, instabilité, frottement, etc.), étant donné que la vitesse est inversement proportionnelle à la fréquence. Plus la fréquence augmente, plus la vitesse diminue.



**Figure 2.8 : Relation accélération, vitesse, déplacement**

La mesure en mode accélération (représentative des forces dynamiques) permet de mettre en évidence des phénomènes dont les fréquences sont élevées (engrènement sur un multiplicateur, passage d'encoches sur un moteur,...) ou qui génèrent des signaux impulsionnels de courte durée, riches en composantes haute fréquence (écaillage de roulement, jeu, cavitation,...). Ce dernier paramètre ne dépend pas de la fréquence. C'est le paramètre privilégié en analyse vibratoire.

### 2.7.1. Choix du mode d'investigation

L'analyse des vibrations permet d'appréhender les différents efforts par tout défaut potentiel qui affecte la machine. Elle permet de rechercher toutes les informations utiles pour tirer un diagnostic correct sur son état mécanique et ainsi connaître la fonction usure de la machine. Une onde vibratoire peut-être étudiée par plusieurs méthodes qui correspondent à des niveaux différents de connaissance du phénomène et à l'utilisation de matériels d'analyse plus ou moins sophistiqués à savoir :

- Indicateurs simples : niveau global, facteur de crête, facteur de défaut, kurtosis,...etc. ;
- Méthodes d'analyse qualitative : analyse temporelle, analyse fréquentielle, analyse d'enveloppe et analyse cepstrale.

#### 2.7.1.1. Mesure du niveau global

La mesure en niveau global permet, en se rapportant à des références connues (normes, spécifications du constructeur, des mesures antérieures, etc.), de quantifier un état général d'une machine tournante et de juger si le niveau de vibration est acceptable. Dans le cas contraire, il est important d'en définir la raison et chercher le phénomène exciteur. Cette mesure permet de détecter la présence d'un défaut, mais ne permet pas de détecter la source du défaut. Elle permet d'exécuter une surveillance basée sur l'appréciation des amplitudes dans une bande de fréquences donnée, qui à son tour s'effectue de façon continue et les valeurs mesurées sont couramment actualisées. Les mesures prélevées sur une machine tournante devront être effectuées aux mêmes endroits pour être comparées et avec le même descripteur. Le rôle des descripteurs dans un système de mesure est important, car il doit qualifier tout type de signal. Il faut remarquer qu'une mesure de vibration doit être considérée comme relative et elle n'a aucune signification lorsqu'elle est isolée. De plus, la valeur d'un indicateur peut ne pas avoir une signification intrinsèque, mais c'est son évolution dans le temps qui est significative de l'apparition ou de dégradation d'un défaut.

En effet, cette méthode consiste à relever les mesures globales sur un équipement lorsqu'il est réputé fonctionner de manière satisfaisante (rendement, consommation, disponibilité,...etc.). Cet état est dit de référence [9]. Dans la pratique, on compare les valeurs réelles des paramètres vibratoires surveillées avec les consignes fixées afin d'établir les critères d'alarme et de danger, ou encore résultant de mesures précédentes pour déceler une évolution significative d'une dégradation. Le seuil d'alarme est généralement fixé à 8 dB au

dessus du niveau de référence. Par contre, le seuil d'arrêt est généralement fixé à 8 dB au dessus du niveau d'alarme (rapport de 2.5).

Cependant, si la mesure du niveau global permet de suivre de manière fiable une machine, elle ne permet pas d'établir un diagnostic. En effet, sous une seule valeur (en déplacement, vitesse ou accélération) tous les phénomènes mécaniques (balourd, lignage, engrenement, roulement) sont confondus, figure 2.8. Cependant, la mesure simultanée de ces trois niveaux globaux, où au moins deux niveaux globaux de déplacement et d'accélération (voir annexe, tableau 1) permettent d'émettre un avis sur la situation du phénomène en fréquence (phénomène d'origine basses ou hautes fréquences). Tout cela montre que cette mesure permet de porter un jugement simple mais grossier sur l'état d'une machine, sans préjuger de l'origine des éventuels défauts. Il faut remarquer que ce mode de relevés est simple, pratique, rapide, peut coûteux et permet de repérer la plupart des machines, cependant, ne permet pas d'établir un diagnostic. C'est pourquoi, ce mode de relevés est souvent utilisé comme premier criblage, capable d'identifier un équipement en fonctionnement anormal.

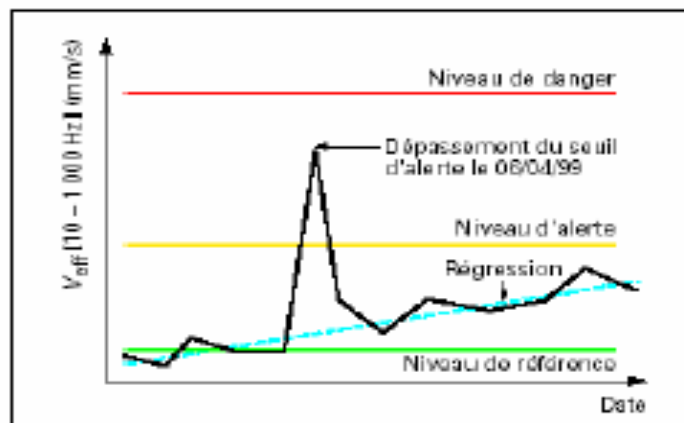


Figure 2-9 : mesure du niveau global

### 2.7.1.2. Analyse spectrale

La surveillance du niveau vibratoire global est souvent insuffisante pour une détection anticipée des dysfonctionnements. Il est donc préférable d'analyser et de surveiller séparément les différentes fréquences vibratoires. A cet effet, grâce à la transformée de Fourier, le signal temporel vibratoire est décomposé en composantes de fréquence et l'analyse spectrale est devenue la technique la plus importante et la plus utilisée dans l'industrie. Elle est plus riche et plus fine, voire donner de très bons résultats. Un spectre permet de déterminer non seulement l'importance de l'anomalie mais aussi sa nature (balourd, désalignement,

défaut de roulement, etc.) [12, 16] et de suivre son évolution dans le temps. Donc, l'analyse spectrale permet de fournir au personnel concerné, non seulement des informations sur le comportement vibratoire instantané, mais donner également des informations sur la tendance des phénomènes et de l'apparition du défaut, voire l'identification de la provenance du défaut, étant donné qu'elle donne la valeur de l'amplitude de chacune des composantes du signal. Cette identification est la clef de diagnostic de défauts.

Le spectre est le concept fondamental de l'analyse en fréquence. C'est la représentation d'un signal dont l'amplitude ne serait plus donnée en fonction du temps mais en fonction de sa fréquence, figure 2-9.

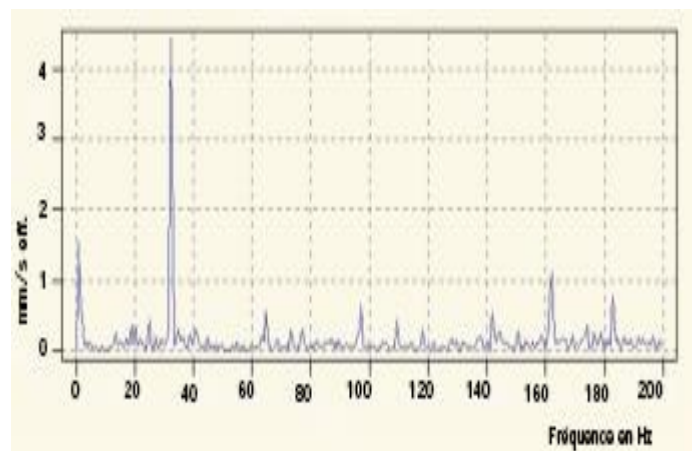


Figure 2-10 : Représentation spectrale ou fréquentielle d'un signal.

Mathématiquement un signal sinusoïdal, est décrit de la façon suivante :

$$A(t) = A \sin(\omega_0 t + \Phi_0)$$

Où A est l'amplitude maxi du signal

$\omega$  : La pulsation en rd/s ( $\omega_0 = 2\pi f_0$ )

$\Phi_0$  : La phase à l'instant  $t = 0$ .

Donc, pour décrire complètement ce signal, il suffit de connaître :

A : amplitude maxi

$f_0$  : Fréquence du signal

$\Phi_0$  : La phase

Ainsi, le diagnostic connu, permet de définir la cause et l'urgence de l'intervention. Il faut souligner qu'une étude cinématique préalable du mécanisme aide au processus d'identification et que la prise du spectre de référence (signature  $S_0$ ), établi lorsque l'état du matériel est jugé de bon fonctionnement est indispensable. En effet, la connaissance de la signature de référence, fonctionnement normal, est nécessaire pour toutes les formes

d'interprétations différentielles. Le diagnostic vibratoire se base sur l'identification du phénomène mécanique à la fréquence de la vibration aux vitesses angulaires des mécanismes qu'il génère. En effet, les fréquences montrant une variation d'amplitude du signal vibratoire correspondent aux vitesses angulaires des mécanismes en défaut. Donc, l'arrivée à la rédaction d'un bon diagnostic est impossible sans connaissance :

- des caractéristiques mécaniques statiques et dynamiques de la machine, de ces modes de fonctionnement et de ses conditions d'exploitation ;
- de tous les défauts ou pathologies susceptibles d'enduire des défaillances ou des dégradations ;
- des symptômes ou images vibratoires associés à chaque pathologie.

Pour cela, il faut donc représenter la vibration dans l'espace temps - fréquences. Cette opération se réalise mathématiquement en décomposant le signal vibratoire périodique complexe (riche en information), en ses différents composants sinusoïdaux, représentés chacun par leur amplitude  $A_i$  et leur fréquence  $F_i$ , en utilisant une transformation temps – fréquence, appelée transformée de Fourier. Cette fonction mathématique réalise une transposition du signal vibratoire de l'espace temporel vers l'espace fréquentiel. La représentation du signal obtenue est appelée un spectre fréquentiel. Le spectre est le concept fondamental de l'analyse en fréquence. C'est la représentation d'un signal dont l'amplitude ne serait plus donnée en fonction du temps mais en fonction de sa fréquence. Une modification de ces fréquences est signe de détérioration. Ce type d'analyse nous donne autant d'informations qu'il y a de fréquences dans le signal analysé pour un seul point de mesure. Actuellement, ce mode de relevé intervient souvent après que le relevé global ait détecté une anomalie. Selon la nature du signal vibratoire, on obtient un spectre de raies discrètes ou un spectre continu, à savoir :

• Les vibrations synchrones qui sont des multiples ou sous multiples de la fréquence de rotation. Ce sont les harmoniques de cette fréquence. On obtient un spectre des raies discrètes. C'est le cas par exemple, des vibrations générées par le balourd, le lignage, les engrenages, les dégradations localisées de roulements, etc. ;

• Les vibrations asynchrones qui ne sont pas liées harmoniquement à la fréquence de rotation. Dans tel cas, le signal est aléatoire ou transitoire. On obtient un spectre continu (l'intervalle entre les raies tend vers zéro), c'est le cas de les turbulences d'écoulement, les dégradations généralisées de roulements de chocs non périodiques, des résonances, etc.

Il faut signaler que l'analyse des phénomènes périodiques est bien plus aisée que celle des phénomènes transitoires ou aléatoires puisqu'ils sont identifiés par des fréquences discrètes.

Ces derniers sont néanmoins significatifs des problèmes réels : ils ne sont donc pas à négliger en diagnostic. Le spectre se représente sous forme d'un graphique montrant l'amplitude à chaque fréquence.

### 2.7.1.3. Choix du type de suivi :

Dans la pratique, généralement, nous disposons de deux méthodes d'acquisition de données. Les arguments de choix portent essentiellement sur des critères économiques.

**a - Périodique ou non permanent « off line » :** Les mesures sont effectuées à des intervalles de temps réguliers et l'évolution des résultats de mesure en fonction de temps permet d'apprécier le comportement de la machines, de reconnaître les symptômes liés à certains défauts et identifier leurs causes et les éléments endommagés. Dans ce type de suivi, les paramètres vibratoires sont souvent accompagné par la surveillance d'autres paramètres (analyse des lubrifiants, performances, ...etc.) et il est utilisé pour la détection des défauts à évolutions lentes. La fréquence des relevés est variable de 2 semaines à 4-6 mois suivant l'importance de la machine. Cette fréquence peut être modifié en fonction de l'évolution des symptômes [17].

**b - Continu ou permanent « on line » :** Dans ce cas, les capteurs sont placés en permanence sur la machine à surveiller et ils sont reliés à un système d'acquisition permettant ainsi une mesure quasi continue. Idem au précédent, il permet de suivre l'évolution de l'ensemble des paramètres. Cependant, il présente l'avantage de détecter des défauts à évolution rapide et d'assurer la sécurité des installations par déclenchement de la machine à l'approche d'un seuil réputé dangereux. Seules les défaillances de type explosif (perte brutale d'aubages de turbine ou de compresseur axial, par exemple) ne sont pas détectables de manière précoce, mais le déclenchement de la machine dès leur apparition, peut limiter les dégâts consécutifs à ces défaillances [17].

### 2-7-4-Choix du paramètre à surveiller

Le fondement de la maintenance conditionnelle repose sur l'élaboration de diagnostics effectués à partir de l'analyse de l'évolution d'un certain nombre de paramètres. Ces paramètres sont appelés des indicateurs de défauts, ou indicateurs de surveillance ou descripteurs. Un indicateur est un quantificateur plus ou moins élaboré issu d'une grandeur dont l'acquisition est le plus souvent possible en fonctionnement. Il doit, par définition, caractériser un ou plusieurs aspects de l'état ou de la performance de l'équipement surveillé. Son évolution ou sa transformation dans le temps doit être significative de l'apparition ou de



l'aggravation d'une dégradation ou d'un dysfonctionnement. Le choix de(s) paramètre(s) mesuré(s) dépend de la complexité, de l'importance et de la valeur de la machine. Le paramètre sélectionné devra être :

∅ Observable ou mesurable. Toutes les mesures physiques habituelles sont potentiellement des paramètres utilisables ;

∅ Significatif de l'évolution du mode de défaillance à anticiper.

Remarquons que ces observations ou mesures sont faites aux frontières ou dans l'environnement du sous- ensemble dégradé ;

∅ Interprétable. L'importance est de savoir établir une corrélation entre la mesure et l'état interne (la pathologie) de la machine. Le plus important dans ce cas est d'être capable de se servir de l'observation non seulement pour connaître l'imminence d'une panne, mais pour diagnostiquer sa nature.

En effet, la connaissance de la nature des phénomènes pathologiques et de leur vitesse d'évolution permet de choisir la période entre deux observations. Le choix du type de suivi doit tenir compte :

∅ De l'accessibilité des capteurs pour des testes de comportements ;

∅ Des volumes disponibles et des chemins possibles pour les câbles des capteurs aux circuits de conditionnement et d'analyse ;

∅ De l'intérêt de redondances dans l'instrumentation ;

∅ De la fiabilité exigée ;

∅ Des caractéristiques de l'environnement : humidité, température, agents chimiques, pression,...etc.

#### **2-7-4-1-La précocité**

La présence de particules métalliques dans le lubrifiant ou la montée en température d'un palier sont souvent des signes de dégradation déjà avancée. Les informations délivrées par ces indicateurs sont tardives par rapport à celles fournies par certains indicateurs issus du mouvement vibratoire de l'arbre ou du palier. A titre d'exemple, dans le cas de paliers à film d'huile certains indicateurs vibratoires permettent d'identifier immédiatement toute amorce d'instabilité de palier ou de frottement au niveau des labyrinthes d'étanchéité, sources potentielles de graves dégradations.

C'est pourquoi donc, en matière de surveillance, il y a donc lieu de distinguer deux classes d'indicateurs :

ü Les indicateurs principaux ou précoces qui permettent d'identifier de manière

précoce l'apparition d'anomalies, sources potentielles de pannes à plus ou moins long terme, et d'en suivre l'évolution. Ces indicateurs sont en relation directe avec les forces dynamiques internes et les fluctuations de couple dont la machine est le siège. La détection du défaut est alors théoriquement possible dès l'apparition de la force dynamique ou des fluctuations de couple qu'il induit ;

Ü Les indicateurs secondaires ou tardifs pour lesquels une évolution significative traduit déjà des dégradations conséquentes et nécessite un arrêt à brève échéance, voire immédiat, de l'installation. Ces indicateurs sont en relation directe avec les altérations induites par les défauts qui apparaissent bien après la modification des forces ou des couples dynamiques qu'ils engendrent. Cette première famille d'indicateurs est particulièrement bien adaptée aux concepts et impératifs de la maintenance préventive conditionnelle ou prévisionnelle. Les informations véhiculées par cette catégorie d'indicateurs permettent la détection de défauts à un stade précoce. De ce fait, les informations tirées des signaux émis par une machine en fonctionnement permettent de réduire considérablement le nombre d'arrêts inopinés sur panne et de planifier les interventions nécessaires au mieux des intérêts de la production, notamment en les intégrant, dans la mesure du possible, dans les arrêts techniques de fabrication.

Cette planification se traduit par une réduction sensible des coûts de remise en état et de la durée d'immobilisation de l'équipement pour maintenance et permet d'optimiser la gestion des stocks de pièces de rechange. Ces propos ne doivent nullement discréditer l'utilisation des indicateurs tardifs. Tout au contraire, les informations fournies par l'association « indicateurs précoces, indicateurs tardifs » constituent des éléments clés dans la prise de décision d'un arrêt programmé urgent pour inspection ou engager une intervention corrective.

#### **2-7-4-2-La sensibilité**

Il ne faut pas confondre la précocité d'un indicateur à détecter un dysfonctionnement et sa sensibilité à le révéler. Le premier terme reflète l'aptitude d'un indicateur à détecter l'apparition d'un dysfonctionnement avant ou aux prémices d'altérations physiques induites par ce dernier. Par contre, le deuxième terme qualifie l'importance de l'évolution de la valeur d'un indicateur en présence d'un défaut révélé par rapport à sa valeur antérieure. Ainsi, à l'apparition d'un écaillage de denture, des indicateurs représentant le facteur de crête ou le kurtosis de l'accélération vibratoire seront beaucoup plus sensibles que des indicateurs représentant la valeur efficace de cette même grandeur.

### 2-7-5-Les points de mesurage

La plupart des vibrations de machines sont issues des parties tournantes ou oscillantes. Elles peuvent être d'origine mécanique, électromagnétique, hydraulique, etc. Elles sont transmises à la structure par l'intermédiaire des paliers, et aux fondations par l'intermédiaire des fixations. On conçoit aisément que les meilleurs points de mesurage dans le cadre de la maintenance conditionnelle des machines sont les paliers. La transmission de ces vibrations dépendra de plusieurs paramètres auxquels il faudra adapter le mode de mesurage. Cependant il faut remarque que le mesurage sur les fixations présente en maintenance un intérêt moindre, mais trouve son application lorsque la machine perturbe son environnement.

### Bibliographies

- [1] F.Champavier : analyse vibratoire des machines tournantes, 01dB-stell MVI technologies group version juin 2002.
- [2] L.Rasolofondraibe : Mise en œuvre des méthodes paramétriques adaptatives pour la surveillance d'une machine de production par analyse vibratoire, Doctorat de l'Université de Reims, spécialité génie informatique, automatique et traitement de signal, 1995.
- [3] J.Philippe : Savoir ausculter les machines tournantes, Laboratoire d'analyse des signaux et des processus industriels, Université Jean Monnet, Paris.
- [4] Comité gestionnaire d'entretien des manufactures et exploiters du Québec. La gestion des équipements « Recueil des meilleurs pratiques en gestion de la maintenance », Montréal, Q.C H27 I58, Québec 2000.
- [5] M.Pavlovski, A.Apostoliouk : Vibrations dans les appareils et machines, éléments de base de protection contre les vibrations, office des publications universitaires, 11-92.
- [6] MEDSERVICES : journées de formation sur la maintenance conditionnelle par analyse vibratoire, Hôtel El-Aurassi, Septembre octobre 2001.
- [7] M.Thomas, F.Lafleur : MEC 763 Techniques de maintenance industrielle, leçon 9 maintenance conditionnelle par surveillance des vibrations, Département de génie mécanique, ETS, été 2003.
- [8] S.Teyar : Diagnostic de l'état des machines tournantes par l'analyse vibratoire, thèse de magister de l'Université Mentouri de Constantine, 2003.
- [9] Bruel et Kjaer vibro : « Stage de la maintenance conditionnelle », présentation des analyses vibratoires, 2001.
- [10] J.Héng : Pratique de la maintenance préventive, Mécanique, Pneumatique, Hydraulique, Electrique, Froid, l'usine nouvelle, série gestion industrielle, Dunod, Paris 2002.

- [11] R.Bigret, J-L.Féron : Diagnostic - maintenance, disponibilité des machines tournantes : modèles – mesurages – analyses des vibrations, collection technologiques, Masson, Paris 1995.
- [12] D.Belalia, D.Boutchicha : Analyse cinématique et vibratoire des machines tournantes sur logiciels spécifiques, C.I.F.I avril 2001.
- [13] E.Niel : sécurité opérationnelle des systèmes de production, laboratoire d'automatisation industrielle INSA, 1996.
- [14] P.Hordas : Outils d'une démarche TPM pour optimiser le lien entre la qualité du produit, la productivité et l'efficacité de la maintenance. DEA, production automatisée, Université Henri Poincaré, Nancy1. CRAN, ESSTIN 2001.
- [15] F.Bogard, D.Karl et al : mise en œuvre d'une méthodologie numérique dans le cadre du suivi de défauts par analyse vibratoire, mécanique industries, ELSEVIER 2002.
- [16] A.Boulanger : Vers le zéro panne avec la maintenance conditionnelle, guide de l'utilisateur, édition AFNOR.
- [17] DUMAS .J : analyse du signal (FFT et filtrage numérique) et analyse des systèmes, 01dB-stell MVI technologies group version février 2001.

## Chapitre 3

### Surveillance des roulements par analyse vibratoire

#### 3-1-Introduction

Le roulement est un organe mécanique simple. Il représente un type de palier relativement simple, économique et performant dans la mesure où il s'adapte assez bien aux vitesses très faibles (par exemple les roulements d'actionneur) à très élevées (roulements de lignes d'arbres de turbines), jusqu'à des charges parfois très importantes tout en restant relativement tolérant au mésalignement ou aux défauts de lubrification, ceux à quoi ne peuvent prétendre les autres types de paliers tels que les rotules, les paliers hydrodynamiques ou à air ou encore les paliers magnétiques [1, 2]. Le roulement est devenu un composant incontournable pour l'industrie, étant donné qu'il figure dans la grande majorité des organes mécaniques vitaux. Sa consommation est de l'ordre de deux milliards de roulement par année, soit 40% de la production mondiale [1]. Dans le domaine spatial et aéronautique, on exige du roulement les performances les plus élevées. Sur les turboréacteurs et les turbomoteurs, le roulement est confronté aux grandes vitesses et aux hautes températures pour un encombrement et une masse minimum. Dans les transmissions des hélicoptères, il doit de plus supporter les fortes charges, les vibrations et la déformation des structures. Sur les engins spatiaux, après la phase de lancement, il doit encore accepter de très basses températures et

des conditions critiques de lubrification. Dans les cimenteries, le roulement est confronté en plus des charges et de température, aux conditions très sévère de lubrification et de poussières [3, 4]. Alors, on voit que les roulements sont des éléments primordiaux sur la majorité des machines tournantes et dont la fiabilité affecte celle des machines dans lesquelles ils sont montés jusqu'à menacer la sécurité des personnes. Sans doute, ce sont les organes les plus sollicités, les plus sensibles en exploitation et une cause de panne très fréquente [2, 5, 6]. Leurs durées de vie sont très limitées, étant donné qu'ils sont utilisés dans des conditions de charge, de vitesse, de température et d'environnement très variées. Suite à ces sollicitations répétées, les roulements restent l'un des points faibles de la machine [7]. Même, si les roulements ont été correctement monté et sont correctement utilisés, ils sont susceptibles de cesser de fonctionner correctement à un certain moment, par suite d'une augmentation du niveau de bruit et de vibration, d'une perte de précision de fonctionnement, d'une détérioration de la graisse ou d'un écaillage de fatigue des surfaces des roulements [3, 8, 9, 10]. De plus, C'est un organe de précision (précision de rotation et précision de position), difficile d'accès et dont l'entretien et/ou le remplacement peuvent engendrer des arrêts de maintenance longs et donc coûteux [5, 8]. C'est pourquoi donc, l'utilisateur cherche pour réduire les coûts de maintenance ne changer que les composants qui ont atteint leur potentiel de vie. Il devient donc nécessaire de développer une méthodologie et des outils – expérimentaux et/ou théoriques- pour évaluer le potentiel restant des composants mécaniques essentiels.

### **3-2- Le préventif des roulements en pratique**

L'utilisation contemporaine de la maintenance préventive des roulements n'exclue pas en pratique et de façon certaine, le risque de panne. De plus, elle entraîne des surcoûts non négligeables à l'entreprise, vu que les éléments de machines sont remplacés, alors qu'ils n'ont pas atteint leur durée de vie optimale, voire même, le tiers de leur vie potentielle. On remarque, sur la courbe de probabilité des défaillances d'un roulement en fonction de la durée de vie (figure3-1), que la périodicité de remplacement est déterminée de manière à ce que le risque défaillances soit très faible. De nombreux roulements, sont remplacés avant la limite de leur durée de vie. Ainsi, il se trouve que le taux de pannes de beaucoup de machines n'est pas toujours amélioré par le remplacement périodique de pièces utilisées. Parfois même, la fiabilité des machines après le remplacement se trouve réduite du fait d'erreurs humaines (mauvais montage) ou des pannes infantiles (défauts de fabrication) des nouveaux organes installés. Ceci représente 10 à 15 % des cas [11].

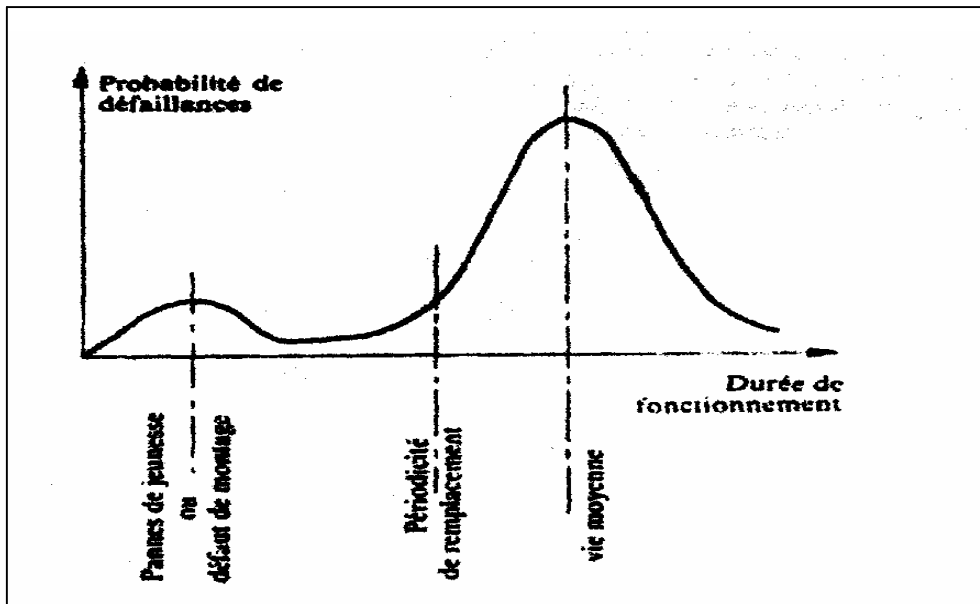


Figure 3-1 : remplacement systématique des roulements

De plus, la dispersion des durées de vies réelles des roulements par rapport aux durées calculées, dépend du mode de maintenance envisagé. L'allure d'apparition de la détérioration des roulements présente un caractère aléatoire. Des roulements identiques, de mêmes dimensions, de même matériaux, appartenant à un même lot, fonctionnant dans les mêmes conditions, auront des durées de vies différentes [10, 12]. La figure 3-2, montre que presque 50% de la population d'un même lot de roulement atteint cinq fois la durée de vie ( $L_{10}$ ).

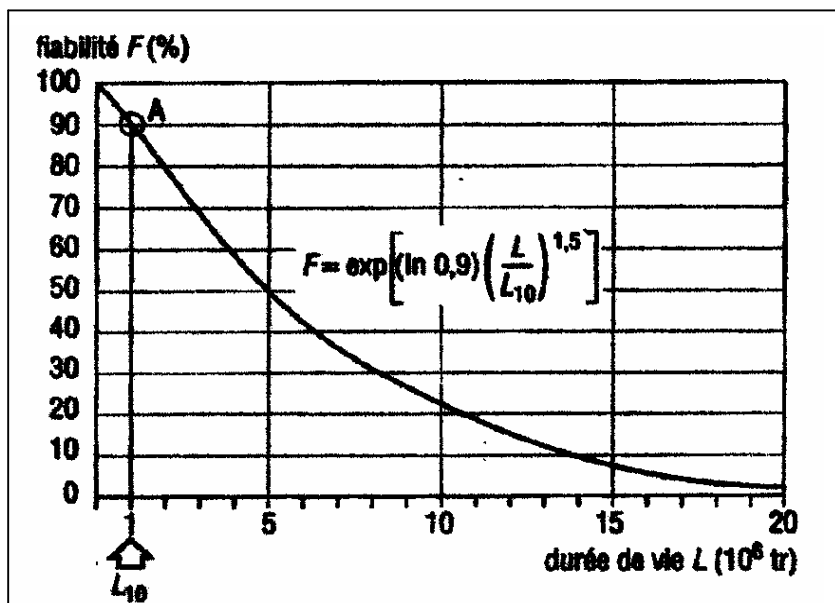


Figure 3-2 : Courbe de fiabilité ( $L_{10}$ , d'après SNR)

Nous remarquons que l'idéal n'est certainement pas dans le tout préventif, beaucoup trop coûteux et techniquement utopique. C'est pourquoi, ce type de maintenance est souvent inefficace et la tendance aujourd'hui est que :

ü le remplacement systématique du matériel doit progressivement disparaître, sauf pour du petit matériel peu coûteux (graissage, filtres, joints, petites pièces, etc.) ;

ü l'auscultation périodique par démontage partiel ou complet (encore très répandue), doit aussi disparaître et céder la place à des méthodes de maintenance plus évoluées, telle que la maintenance conditionnelle, pour faire face à ces nouveaux enjeux et mieux appréhender la notion de durée de vie.

### 3-3 - Causes potentielles de dégradation

Le roulement est constitué généralement de deux bagues (interne et externe), l'une fixe et l'autre tournant avec le rotor, dans lesquelles sont pratiquées les gorges de roulement, où se meuvent les parties roulantes, figure3-3. C'est un organe qui assure à lui seul plusieurs fonctions principales suivant le genre d'utilisation de celui-ci. Ces fonctions doivent être assurées au cours d'une période prolongée de fonctionnement continu ou intermittent. Il permet le positionnement d'un arbre par rapport à son logement, tout en assurant une rotation précise avec le minimum de frottement et transmet les efforts radiaux et/ou axiaux, ainsi que le guidage en rotation.

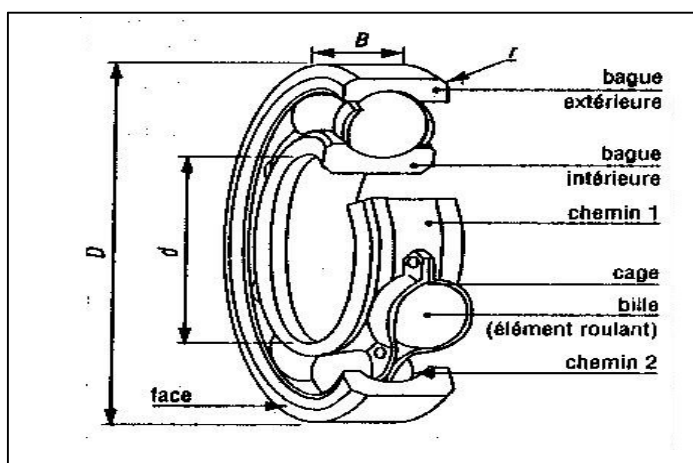


Figure3-3 : Constitution générale d'un roulement

Comme tous les organes mécaniques et outre les avaries résultant d'une détérioration naturelle, les causes de dysfonctionnement des roulements sont très nombreuses. Un roulement peut cesser de fonctionner correctement sous l'effet d'un grippage par



échauffement ou d'une avarie de fatigue de l'un des éléments constituant le roulement, telle qu'une fissure, une rupture, ou une éraflure profonde ou encore par suite d'une avarie de son système d'étanchéité ou encore un mauvais montage et par conséquent, réduire sa durée de vie et conduire à des dégâts imprévisibles. Les constructeurs donnent une durée de vie pour leur remplacement, ce pendant, celle-ci n'est valable que sous certaines conditions idéales [11]. De ce fait, des progrès considérables ont été fait dans l'identification des mécanismes d'endommagement pouvant conduire à une ruine du roulement. En effet, d'après une étude menée par la société SKF, 16% des dégradations de roulements ont pour origine des maladresses de montage ou à l'utilisation d'outils inadaptés, 36% des avaries de roulement sont dues à la mauvaise lubrification, 14% des dégradations sont dues au contamination des chemins de roulement et/ou du lubrifiant par des corps étrangers et 34% sont dues à la fatigue des roulements (surcharge, entretiens insuffisants ou inadaptés, etc.) [10, 4]. Finalement, il faut noter que tout défaut de surface peut jouer le rôle de site d'amorçage. Il peut être un défaut géométrique (strie d'usinage, indent produit par le passage d'un débris solide, rayure de rectification, etc.) ou encore d'un défaut du matériau consécutif à son élaboration (inclusion en surface ou à l'usinage (brûlure de rectification)). Remarquons encore l'effet des contraintes résiduelles ou de montage qui ne doit pas être négligé. Nous remarquons que les principales causes de dégradations des roulements sont la défaillance du film de lubrifiant et de la fatigue (plus de 70% des cas). Vue l'importance de ces deux phénomènes, nous essayons de les décrivez avec plus de précision.

### **3-3-1- Grippage et micro grippage**

Par lubrification, nous entendons que l'huile est supposée garder séparées les pièces mobiles, les empêchant de se toucher. Le contact métallique entre deux pièces mobiles accroît le frottement, engendre ainsi de la chaleur et conduit à une usure extrême. Il en résulte le grippage et par conséquent, une détérioration complète de l'équipement. Donc, le grippage est un phénomène qui se traduit habituellement par une rupture du film de lubrifiant séparant les surfaces en contact ayant pour conséquence la fusion d'une couche superficielle des massifs en contact, au moins un des composants en contact, associées à une émission de fumée et de bruit [12, 13], dénomination étendue au micro grippage pour les roulements fonctionnant à grande vitesse. Il survient brutalement et conduit généralement à l'arrêt de la machine dans les secondes qui suivent. Le grippage se rencontre dans tous les mécanismes lubrifiés ou non lorsque la combinaison (charge normale, vitesse de glissement) excède une limite encore mal connue. Le grippage est une avarie classique dans les engrenages, les

roulements, les systèmes piston chemise,...etc., généralement connue sous le nom en anglais « scuffing, scoring ou smearing ». Le micro-grippage apparaît sur la surface de certains composants mécaniques (roulement à billes ou à rouleaux, vis à billes ou à rouleaux, ...etc.) sous certaines conditions de fonctionnement, essentiellement pour une faible charge, une vitesse de glissement élevée et un lubrifiant de faible viscosité. C'est un phénomène dont l'origine la plus connue est liée au glissement de la cage [14, 15]. La surface endommagée a typiquement l'aspect d'une peau d'orange. L'enlèvement de la matière se fait progressivement couche après couche. Le défaut dans ce cas se propage sur toute la surface de contact, peut finalement être à l'origine d'une avarie catastrophique (écaillage initié en surface, augmentation du jeu dans le roulement, grippage sévère, etc.) Il faut remarquer que le micro grippage n'est pas une avarie catastrophique en soi. Cependant, il peut toutefois conduire à la défaillance du mécanisme par l'augmentation importante du jeu radial dans le roulement ou en étant à l'origine d'un écaillage profond amorcé en surface. Le grippage peut également se produire aux contacts billes/bague sous l'effet d'un pivotement anormalement élevé [15].

### 3-3-2-Fatigue

La fatigue des roulements est l'un des facteurs déterminants pour la durée de vie de celui-ci. C'est un phénomène complexe qui fait intervenir les propriétés du matériau, la géométrie de contact, la cinématique, le chargement, les propriétés du lubrifiant, la température et la topographie de surface [1, 16]. Ainsi, tous défaut de surface peut jouer le rôle de site d'amorçage. Il peut s'agir d'un défaut géométrique (stries d'usage, indent produit par le passage d'un débris solide, rayure de rectification) ou encore d'un défaut de matériau consécutif à son élaboration (inclusion, hétérogénéité) ou à l'usage (rayure ou brûlure de rectification). Deux échelles d'endommagements de fatigue présents dans les contacts hertziens lubrifiés sont aujourd'hui bien connues, à savoir : Le micro-écaillage et l'écaillage profond.

Le micro-écaillage est une avarie causée par de micro-fissure et de micro-écaille à l'échelle des aspérités, qui apparaît après une courte période d'incubation, et ceci quasi indépendamment de la charge normale. Cette fatigue peut être aggravée par des effets comme la lubrification insuffisante, l'état de surfaces, les chocs, etc.

L'écaillage profond, qui lui est à l'échelle du contact, est amorcé soit en surfaces à partir de défauts provenant de l'usage ou du fonctionnement (rayure ou brûlure de rectification, indentation d'une particule, micro-écaillage et micro-fissure), soit en sous

couche à partir d'une hétérogénéité présente dans le matériau à la profondeur Hertz ou encore après un fonctionnement avec un lubrifiant pollué. Il faut remarquer que la pression hydrostatique du lubrifiant piégé dans une fissure dont les lèvres s'est renfermée au passage de la charge joue un rôle prépondérant dans la propagation de la fissure. Il est à noter que l'observation des premières micro-fissures et micro-écaillages se fait habituellement dès  $10^5$  cycles. Ceci montre l'importance des tous premiers cycles et en particulier du rodage.

### **3-3-3-Processus de dégradation d'un roulement [17]**

La durée de vie d'un roulement est limitée par la fatigue superficielle des matériaux le constituant due au grippage, micro-écaillage, micro-fissures, ...etc. Tous ces défauts ont en commun le fait qu'ils se traduisent tôt ou tard par une perte de fragments de métal, qu'on appelle l'écaillage [5, 6, 17], précurseur de la destruction. Ceci est due aux contraintes créées par le passage répétitif des billes sur la cage ou les pistes du roulement en coïncidence avec une écaillure, se traduisant par un choc brutal répété des billes sur la cage de roulement. Ce type de choc est caractérisé par un signal vibratoire du type impulsionnel qui se propage sur la bague, puis sur la cage externe du roulement : impulsion [8]. Un tel signal couvre une large bande de fréquence. Ces impulsions deviennent la source de modulation d'amplitude du signal aléatoire de vibrations. Elles sont caractérisées par une montée très raide et par une durée très courte et par conséquent on aura une augmentation de la valeur efficace du signal vibratoire et de son facteur de crête [6, 10, 18]. De nombreux appareils permettent la détection précoce des anomalies de roulement. Leur but est de détecter les chocs répétés le plus tôt possible. Sur la figure 4 sont présentés les différentes étapes de dégradations d'un roulement.

Pour un roulement neuf ou en bonne état, (figure 3-4 a). C'est la période pendant laquelle il n'existe aucun défaut de surface et en conséquence aucune vibration. Dans ce cas, le signal vibratoire généré est de faible amplitude, aussi bien en valeur crête qu'en valeur efficace. Dès que le roulement sera affecté de défauts (piqûre, strie, écaillage, etc.), il génère des chocs périodiques de courte durée qui peuvent être liées à la structure interne du roulement. Deux phases sont à distinguer :

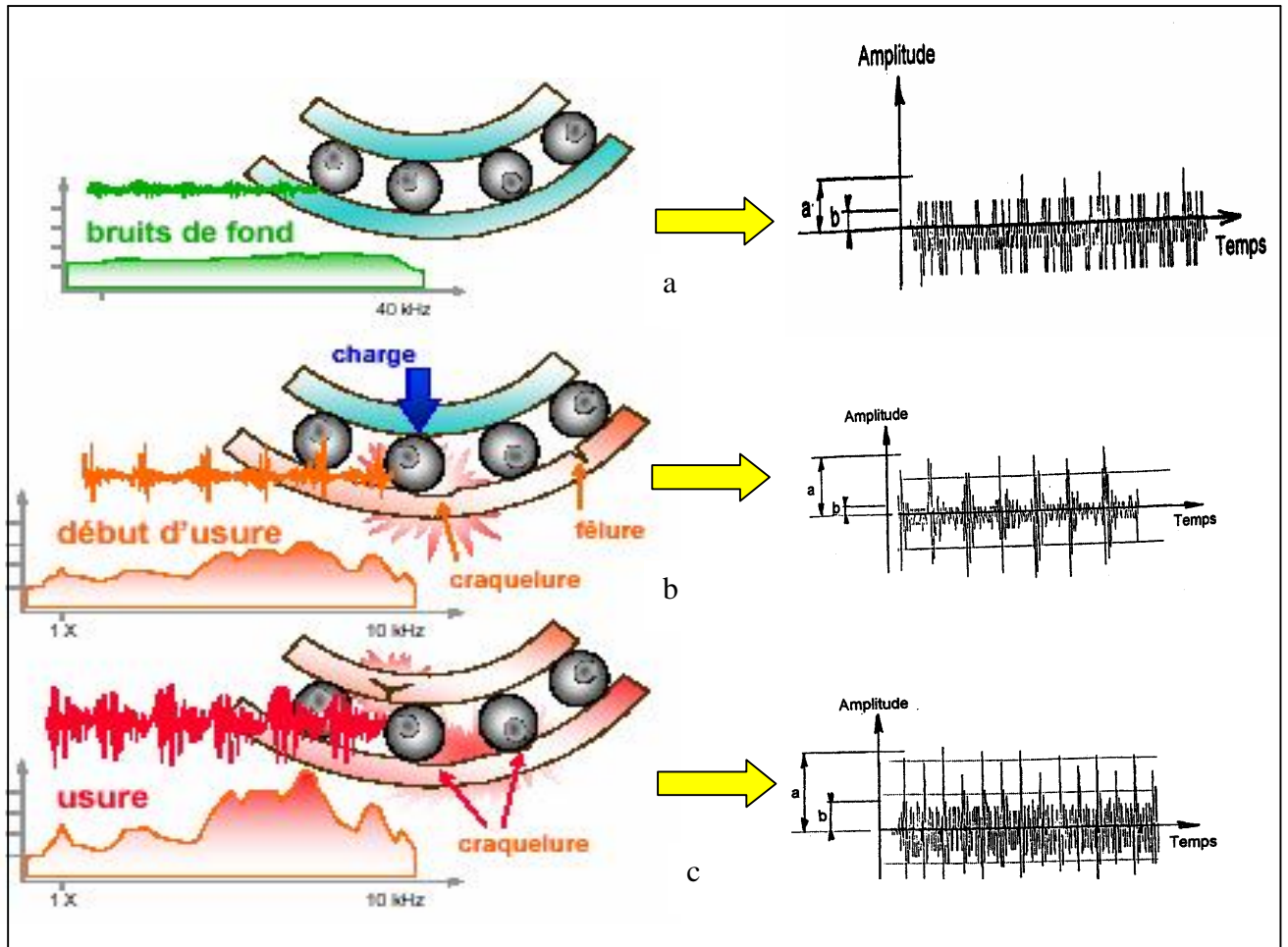


Figure 3-4 : Processus de dégradation d'un roulement

**Le première phase :** le défaut est localisé, première phase de détérioration, figure3-4b. Dans ce cas, le taux de répétition des chocs est suffisamment faible et le signal vibratoire généré présente une amplitude de crête forte et une amplitude efficace faible, donc un facteur de crête important. En fonctionnement le passage des billes sur ces défauts, engendre des chocs périodiques dont le nombre et l'amplitude dépendent de l'état de détérioration du roulement. Dans ce cas, il est possible de redéfinir la durée de vie du roulement au fur et à mesure du temps dès lors que les paramètres et des critères sont soigneusement choisis.

**Le deuxième phase :** le défaut est généralisé, cette phase est caractérisée par une défaillance imminente du roulement avec la création de vibrations apériodiques, figure3-4c. Dans ce cas, le taux de répétition des chocs est trop important et le signal vibratoire généré présente des amplitudes crêtes et efficaces fortes, donc un facteur de crête faible. Les vibrations engendrées ne sont plus périodiques et deviennent aléatoire. Généralement les paramètres et les critères choisis au cours de cette phase deviennent non significatifs.

Donc, un roulement qui fonctionne dans des conditions de surcharge, de mauvaise lubrification ou qui commence à se détériorer, émet des signaux caractéristiques qui peuvent être détectés et interprétés tout en faisant appel à la maintenance conditionnelle [19,20]. Cela permet de prévenir les avaries qui apparaissent habituellement inattendues. La base du diagnostic est de détecter l'augmentation de l'énergie du signal, ou plutôt, si l'on veut avoir une détection précoce, de ce qui dans l'énergie indique la présence de petits chocs répétés.

On voit que l'apparition d'une avarie de surface a généralement des conséquences préjudiciables sur le bon fonctionnement d'un mécanisme. Les techniques d'entretien préventif et d'intervention régulière et systématique bien que coûteuses, ne garantissent pas l'absence de défaillance. En conséquence, il est économiquement bénéfique de contrôler in-situ, de manière intermittente ou en continu, l'état de bon fonctionnement d'une machine.

La reconnaissance de la nature de ces vibrations est un élément précieux pour la détermination de l'origine d'une anomalie. En mettant en évidence la répétition de cette impulsion, on définit ainsi les fréquences cinématiques caractéristiques des défauts de chaque élément du roulement, tout en tenant compte de la vitesse de rotation de la partie mobile, du type et des dimensions de roulement.

Quatre fréquences caractéristiques sont à distinguer :

- la fréquence de passage des billes sur la bague externe du roulement,  $f_{be}$  ;

$$f_{be} = \frac{f_{rot} \times N_b}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (3.1)$$

- la fréquence de passage des billes sur la bague interne du roulement,  $f_{bi}$  ;

$$f_{bi} = \frac{f_{rot} \times N_b}{2} \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (3.2)$$

- la fréquence de rotation des billes sur eux même,  $f_e$  ;

$$f_e = \frac{f_{rot} \times D}{2d} \left( 1 - \left( \frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right) \quad (3.3)$$

- la fréquence de passage d'un défaut de cage,  $f_c$ .

$$f_c = \frac{f_{rot}}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos a \right) = \frac{f_{be}}{N_b} \quad (3.4)$$

Mais comme le choc dû au défaut se produit à chaque tour de bille, à la fois sur la bague interne et sur la bague externe, la fréquence cinématique de passage d'un défaut de bille est exprimée généralement par la formule suivante :

$$2f_c = \frac{f_{rot} \cdot xD}{2d} \left( 1 - \left( \frac{d}{D} \cos a \right)^2 \right) \quad (3.5)$$

Avec :

$N_b$ , le nombre d'éléments roulants (billes) ;

$D$ , le diamètre primitif ;

$D$ , le diamètre des éléments roulants, les billes ;

$a$ , l'angle de contact ;

$f_{rot}$ , la fréquence de rotation de la bague en mouvement

Lorsqu'il y a un défaut (écaillage, strie, indentation,...) sur l'un des éléments du roulement, le choc se produit donc à la fréquence cinématique correspondante.

### 3-4 – Détection des défauts du roulement

L'expérience a montré, que parmi les différents phénomènes physiques utilisés pour mettre en évidence des défauts de fonctionnement ou de dégradation d'une machine tournante et donnant une meilleure mesure de son état, est la vibration. Les vibrations fournissent des paramètres fondamentaux permettant la détection précoce des causes de défaillance et ainsi définir l'organe défectueux sans démontage de la machine. Par conséquent, la correction éventuelle et la programmation des opérations de maintenance seront limitées aux seuls maillons et organes défaillants. Toutes les machines vibrent et au fur et à mesure que l'état de la machine se détériore (balourd, usure de roulements, usure d'engrenages, défaut d'alignement, défaut de graissage, desserrage, jeu, fissures, etc.), la signature vibratoire change. C'est la première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle de dégradation et de panne [10]. Les techniques et les méthodes mises en œuvre pour caractériser et surveiller l'état des roulements dans une machine tournante sont nombreuses et très diverses et consistent à analyser le signal fourni par un accéléromètre. Chacune de ces méthodes correspond à des niveaux différents de connaissances du phénomène et à l'utilisation de matériels d'analyse. Ces techniques peuvent être regroupées en trois grandes

familles, figure3-5. Il faut signaler que les méthodes et les résultats dans le domaine de l'analyse vibratoire intéressent directement la production industrielle [21].

### Techniques de surveillance de l'état des roulements

β

#### Méthodes et techniques

3/4 3/4

β

β

β

Méthodes fréquentielles	Méthodes statistiques temporelles	Méthodes de filtrage
FFT, analyse d'enveloppe, analyse cepstrale, ...etc.	Valeur efficace (RMS), valeur crête, facteur crête, kurtosis, recettes de constructeur (BCU, Fd, etc.)	(de bruitage) passe haut et passe bande

Figure3-5 : Techniques de surveillance des roulements

#### 3-4-1-Méthodes statistiques

Dans cette partie de travail, nous allons utiliser les méthodes de traitement de signal associées à des méthodes statistiques appropriées, pour mettre en évidence la détection de la détérioration précoce d'un roulement, utilisant un des différents indicateurs des méthodes statistiques temporelles.

##### 3-4-1-1- Valeur efficace

La valeur efficace, donnée par l'expression suivante :  $V_{RMS} = [1/N \sum (x_i^2)]^{1/2}$  permet de contrôler rapidement l'état de la machine et d'indiquer si les conditions de fonctionnement ont évoluées de manière inquiétante depuis la dernière mesure. Ce critère n'évolue pas de manière significative au cours de la 1<sup>ère</sup> phase de dégradation, il ne commence à croître que pendant la 2<sup>ème</sup> phase de dégradation [10]. Ceci est un point faible pour la maintenance conditionnelle et rend la détection précoce impossible. De plus le signal vibratoire recueilli par le capteur contient toujours des bruits non seulement de la machine mais aussi de l'environnement, ce qui peut entraîner une mauvaise interprétation de la valeur RMS, surtout dans un espace industriel où les machines ne sont pas isolées, sans toutefois oublier l'effet de masque.

### 3-4-1-2- Valeur crête

La valeur crête, donnée par :  $V_c = 20 \log (A_m/\sigma_x)$  est un indicateur qui caractérise l'amplitude maximale des chocs. Il se manifeste dès l'apparition de la première écaillage et donne une information très précoce de la prédiction. Malheureusement, c'est un mauvais indicateur une fois que la dégradation s'accroît.

Il faut remarquer aussi, que ces deux indicateurs ( $V_{RMS}$ ,  $V_c$ ) dépendent de la vitesse de rotation, des charges de la machine et des dimensions des roulements. Ceci est un inconvénient pour la surveillance des roulements (seuil de la surveillance).

Pour palier à cela, des méthodes équivalentes ont été introduites, telles que :

- le facteur de crête :  $F_c = V_c/V_{RMS}$  ;
- le facteur de défaut :  $F_d = a F_c + b V_{RMS}$ .

Malheureusement, il est impossible de déterminer si le roulement est en début ou en fin de dégradation, au moins pendant les 1<sup>ères</sup> mesures. Un autre indicateur permettant de caractériser le caractère impulsif d'un signal vibratoire, en particulier pour les roulements, fondé sur l'examen de la distribution d'amplitude d'un signal vibratoire, est le kurtosis.

### 3-4-1-3- Le kurtosis

Le kurtosis, donnée par :  $K=1/N \sum_1^n (x_i - \bar{x})^4 / \sigma^4$  est un indicateur adimensionnel permettant de caractériser le degré d'aplatissement d'une distribution d'un signal vibratoire [21]. Il a l'avantage d'être indépendant des variations des vitesses de rotation et des charges de la machine.

Prenons l'exemple d'un roulement dont nous avons suivi l'évolution du kurtosis, en faisant varier la gamme de fréquence et celle de l'amplitude. Cette étude permet d'introduire le kurtosis, comme l'un des paramètres de la loi de dégradation d'un roulement.

En effet, le signal vibratoire d'un roulement en bon état génère un signal de distribution gaussienne avec un kurtosis voisin de 3 compris entre (2.75 – 3.25) [22,23]. Par contre, la détection d'un défaut précoce produit un signal transitoire et périodique avec une allure de distribution modifiée avec un kurtosis plus grand, figure3-6. Pour quantifier ce changement de distribution, le kurtosis est le facteur le plus sensible



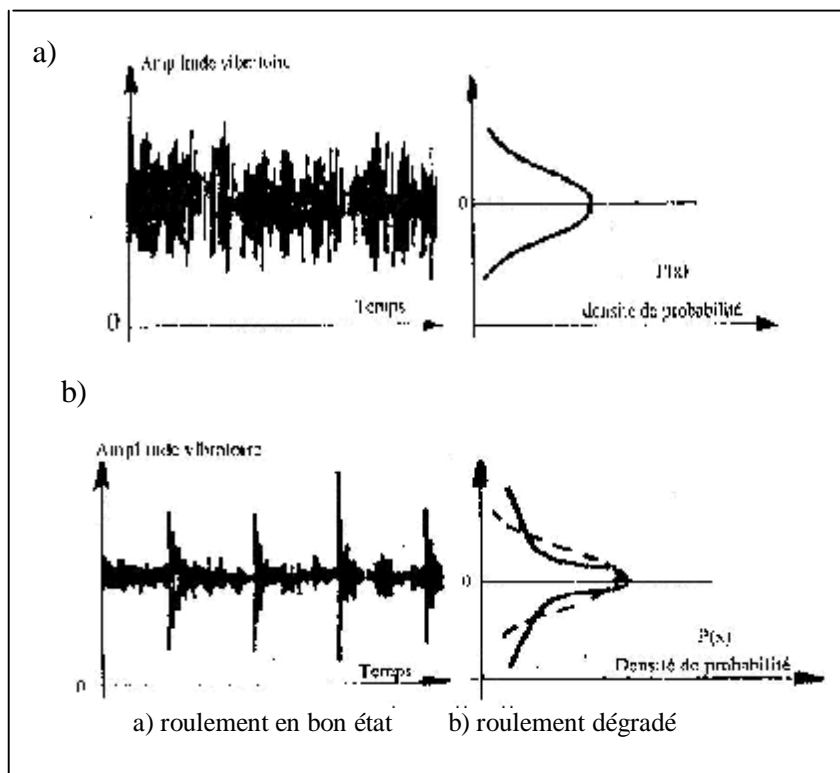


Figure3-6. Signature vibratoire d'un roulement

### 3-4-1-4- Etude expérimentale

Nous étudions le cas d'un roulement à rangée à billes et à contact oblique, pour des conditions de fonctionnement sous une charge purement radiale constante et de différentes vitesses de rotation. Il s'agit de faire monter une procédure expérimentale pour laquelle on cherche premièrement à montrer l'efficacité de l'indicateur utilisé pour évaluer l'état de santé du roulement, son comportement et deuxièmement quelle est la position meilleure des capteurs de proximité utilisés. L'objectif de ce travail est de mettre au point une technique non destructive de diagnostic de l'état de santé d'un équipement. Pour ce fait, nous avons utilisé le dispositif donné sur la figure3-7. La bague intérieure fut montée sur un axe tournant, la bague extérieure dans un logement fixe. L'essai a été répété pour sept roulements de même type. Le kurtosis a été mesuré dans le temps, tout en faisant varier la fréquence de rotation. La collecte des données nécessaires à la mesure et l'analyse, a été effectuée à l'aide de deux accéléromètres, disposés respectivement, parallèlement (capteur 12) et perpendiculairement (capteur 11) à la charge. Etant donné que le signal vibratoire d'un choc couvre une large bande de fréquence, seulement la partie haute fréquence sera utilisée pour évaluer l'état de roulement. La partie basse fréquence est à écarter parce qu'elle est

toujours perturbée par des phénomènes mécaniques générés par d'autres défauts de la machine (balourd, désalignement,...etc.).

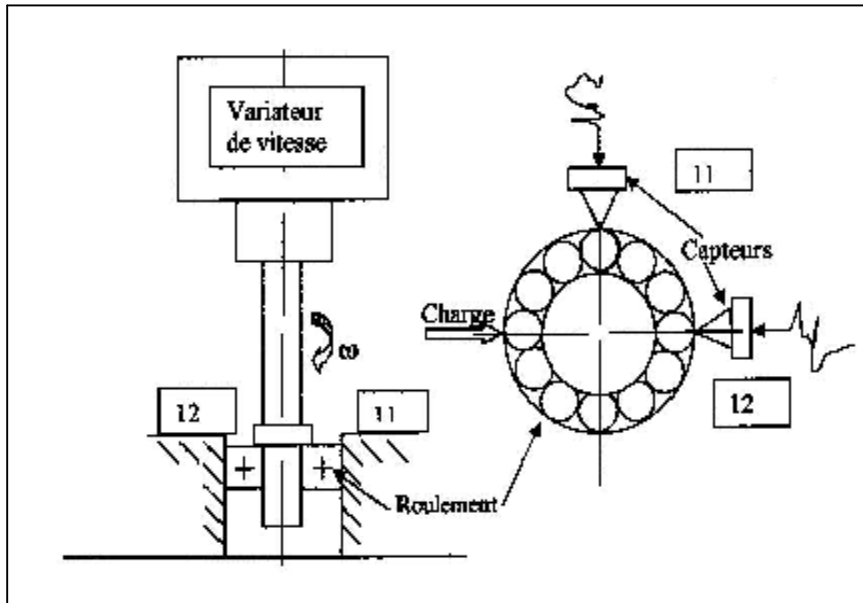


Figure3-7. Dispositif expérimental

### 3-4-1-5- Résultats et discussion

Sur les figures 3-8 et 3-9, on présente la variation du kurtosis pour chaque cas de mesure.

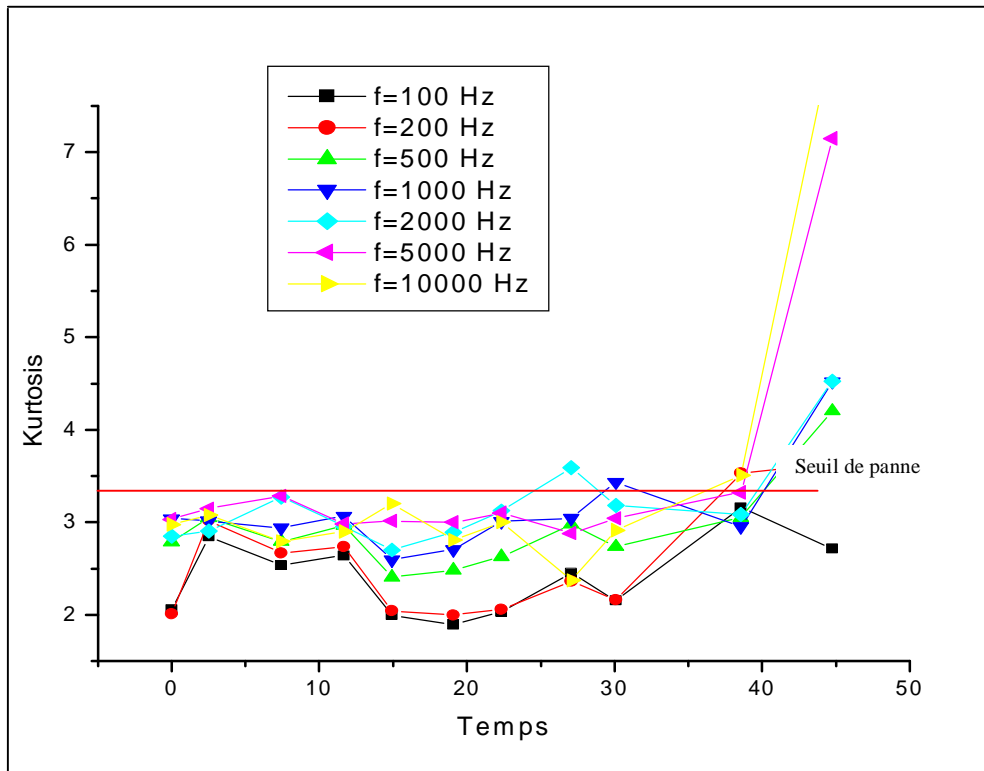
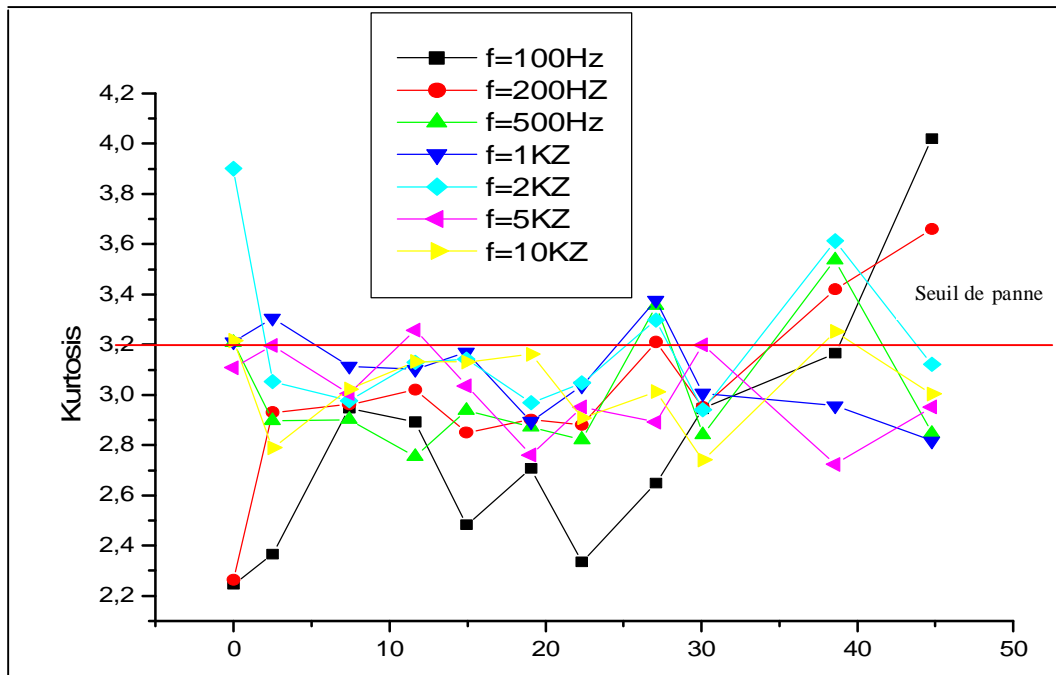


Figure 3-8 : Variation du kurtosis longitudinal en fonction du temps



**Figure 3-9 : Variation du kurtosis vertical en fonction du temps**

Sur la figure3-8, nous représentons l'évolution du kurtosis dans le temps pour différentes fréquences de rotation et avec un capteur placé parallèlement à la charge. On remarque que cette disposition du capteur ne permet pas de donner un diagnostic fiable sur l'état de dégradation du roulement, les amplitudes de vibration à cet endroit sont plus faibles à cause du jeu qui est minimum.

Sur la figure3-9, nous représentons l'évolution du kurtosis dans le temps pour différentes fréquences de rotation et avec un capteur placé perpendiculairement à la charge. Cette disposition du capteur permet de détecter l'évolution de la dégradation par un accroissement important du kurtosis. Cet accroissement est plus marqué pour les hautes fréquences (1,2,5,10 Kz). Dans cette direction, le jeu est maximal entre les éléments actifs du roulement, ce qui nous a permis de caractériser l'impulsion.

### 3-4-1-6- Conclusions

La qualité des roulements est un facteur essentiel pour disposer des meilleures performances des machines tournantes. La durée de service des roulements est influencée directement par l'efficacité de l'étanchéité mise en application, des procédures de montage des roulements et de la politique de la maintenance envisagée, sans oublier la qualité intrinsèque du produit.

La détection de la détérioration précoce d'un roulement est mise en évidence par l'utilisation d'un indicateur de défaut statistique temporelle qui est le kurtosis. Dans le cas des roulements traités, l'évolution du kurtosis a été étudiée pour différentes gammes de fréquences de rotation. Cette étude a permis d'arriver aux conclusions suivantes :

- Le kurtosis semble bien adapter à la surveillance de certains éléments de machines tournantes, en particulier les roulements, à condition d'avoir une bonne qualité de mesure (positionnement des capteurs) ;
- Le kurtosis permet à l'utilisateur de disposer d'un outil particulièrement adapté à la surveillance de chocs périodiques et de quantifier le caractère impulsionnel d'un signal ;
- Permet aussi de détecter les problèmes de lubrification des roulements. Lors d'une augmentation de ce paramètre, il suffit de faire un graissage et d'effectuer une nouvelle mesure, pour se rendre compte s'il s'agit d'une usure ou d'un simple manque de lubrification ;
- Il présente l'avantage d'être un indicateur simple à surveiller au cours du temps

### **3-4-2-Méthodes fréquentielles**

En mécanique, beaucoup de défauts (écaillages, usure, défauts de graissage, jeux excessifs, etc.) induisent des forces impulsionnelles qui excitent des résonances de structures (bagues de roulement, paliers, denture, etc.). Selon la nature du défaut, les fréquences de répétition peuvent être aléatoires (usure, défaut de graissage, etc.) ou périodiques dans le cas de défauts localisés (écaillages, fissures, indentations, etc.) ou de jeux excessifs. Les fréquences des résonances excitées peuvent s'étendre, selon les vitesses de rotation et la nature de défaut, de quelques hertz à plusieurs dizaines voire à quelques centaines de kilohertz. Il faut remarquer que pour cette technique d'analyse, la notion de résonance (moyennes, hautes ou très hautes fréquences) est une notion relative et dépend essentiellement de la fréquence de rotation. Ainsi la détermination des fréquences de répétition des chocs associés à une connaissance parfaite de la cinématique de la machine permet de localiser, voire de déterminer la nature exacte du défaut.

#### **3-4-2-1-Etude de cas réel**

Cette étude concerne le roulement (24060c) se trouvant à l'entrée du réducteur du broyeur verticale d'une chaîne de production d'une cimenterie, supportant des charges axiales. La fréquence de rotation de l'arbre du réducteur est de 16.5 Hz (990tr/min). Ce

diagnostic a été effectué suite à un changement du rythme de fonctionnement causant un bruit anormal signalé par l’exploitant.

On remarque sur la figure3-10 une nette évolution du niveau global du signal délivré par l’accéléromètre fixé sur le palier selon une direction axiale, confirmée par la courbe de tendance (du point C1 au point C2) et le spectre figure 3-11, conséquence d’un problème dans le fonctionnement. Pour déterminer la nature du défaut, nous passons à l’analyse spectrale. Nous remarquons que cette tendance du signal est la conséquence de l’excitation d’une résonance centrée autour d’une fréquence de 5900 Hz, figure 3-12 (son énergie est concentrée autour de la fréquence de résonance de 5900 Hz). Par démodulation du signal d’excitation de la réponse de cette résonance, figure 3-12, nous remarquons que cette dernière est excitée par des chocs périodiques dont les fréquences de répétition correspondent à la fréquence du défaut de la cage du roulement (24060C) qui est de 7.26 Hz.

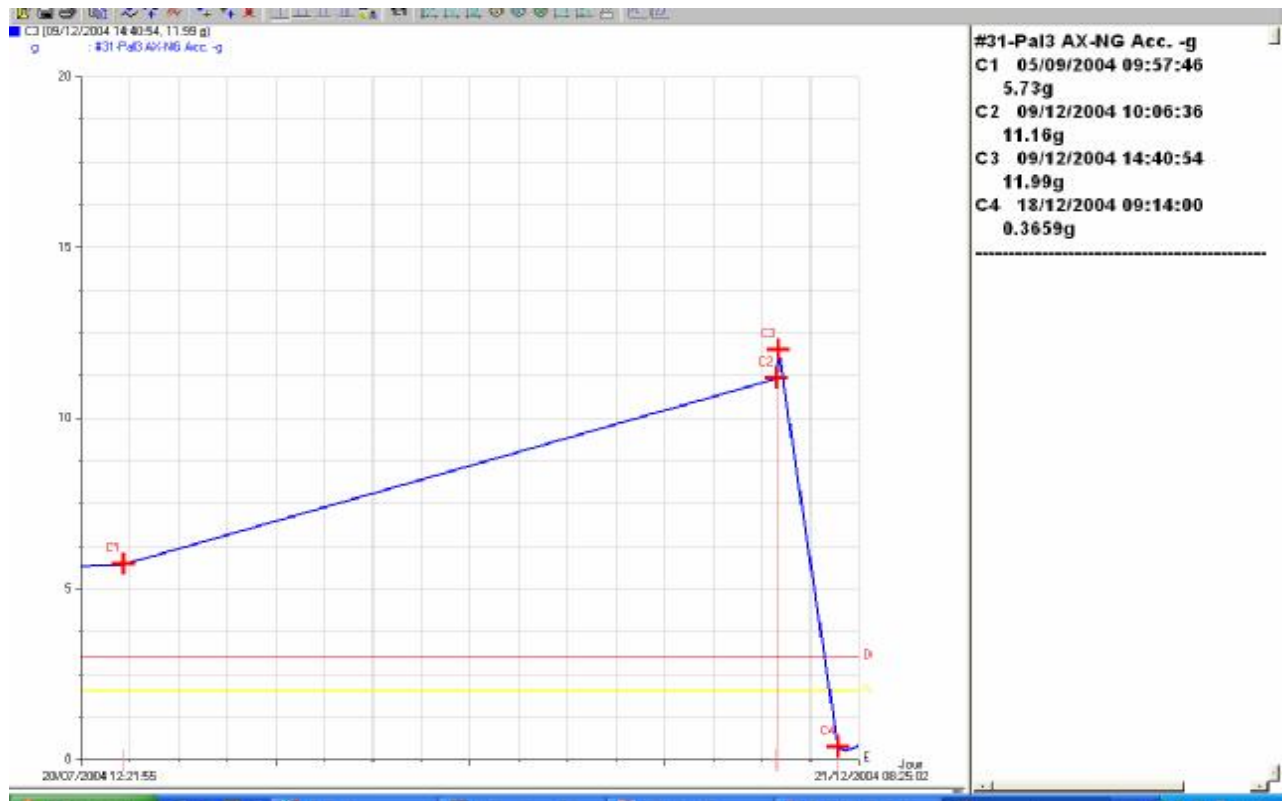


Figure 3-10 : Tendance du défaut de roulement dans le temps

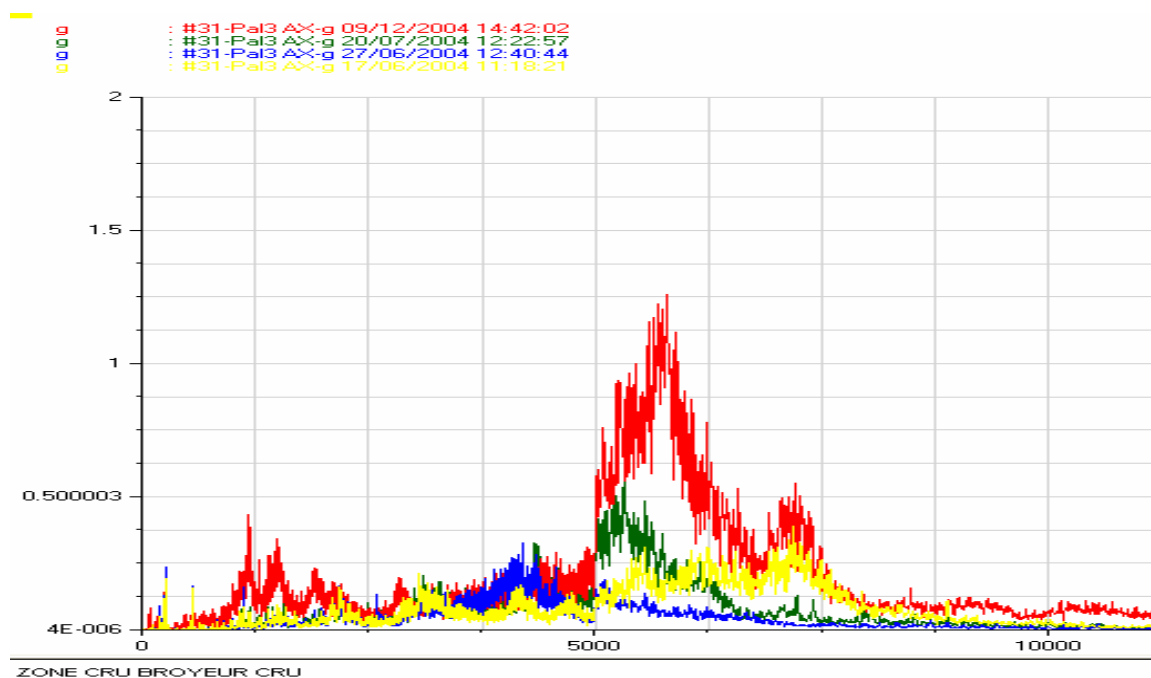


Figure 3-11 : Evolution du spectre dans le temps

Le spectre de l'enveloppe, figure 3-13 permet d'identifier la destruction de la cage du roulement. La décision prise est de faire changer le roulement. Après le changement du roulement, on remarque une nette atténuation du spectre et de la tendance. L'examen du roulement une fois démonté et remplacé met en évidence la destruction de la cage. Ce qui montre bien l'efficacité de l'analyse spectrale.

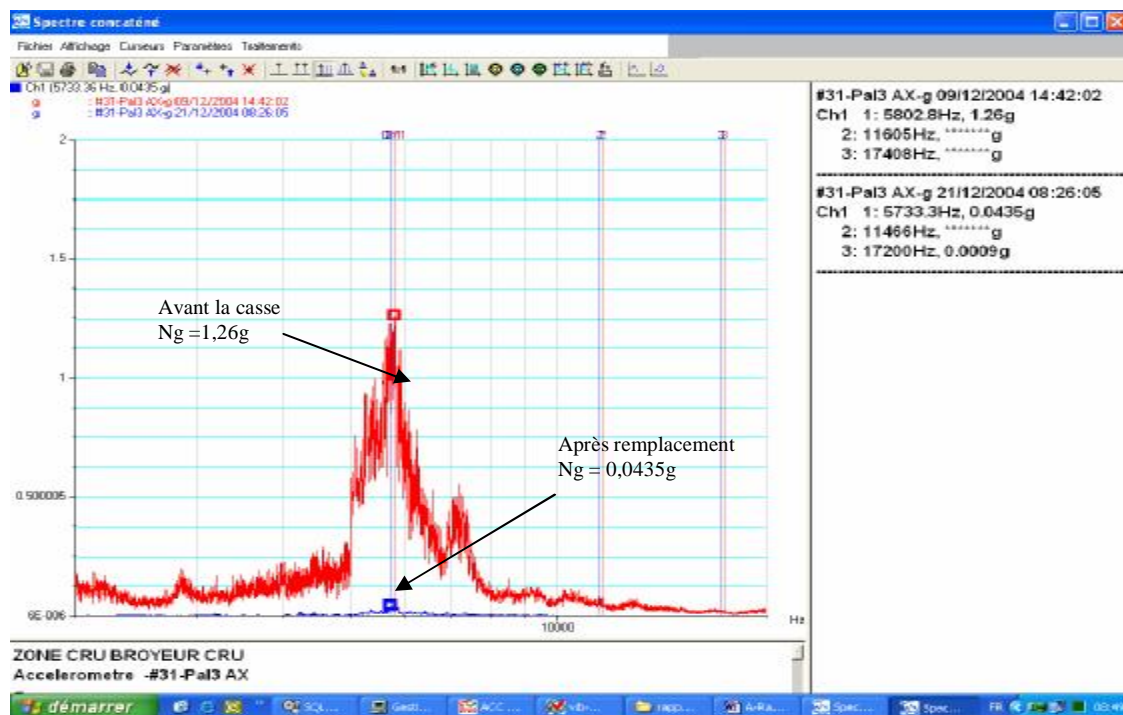


Figure 3-12 : Atténuation de la valeur du spectre après le remplacement

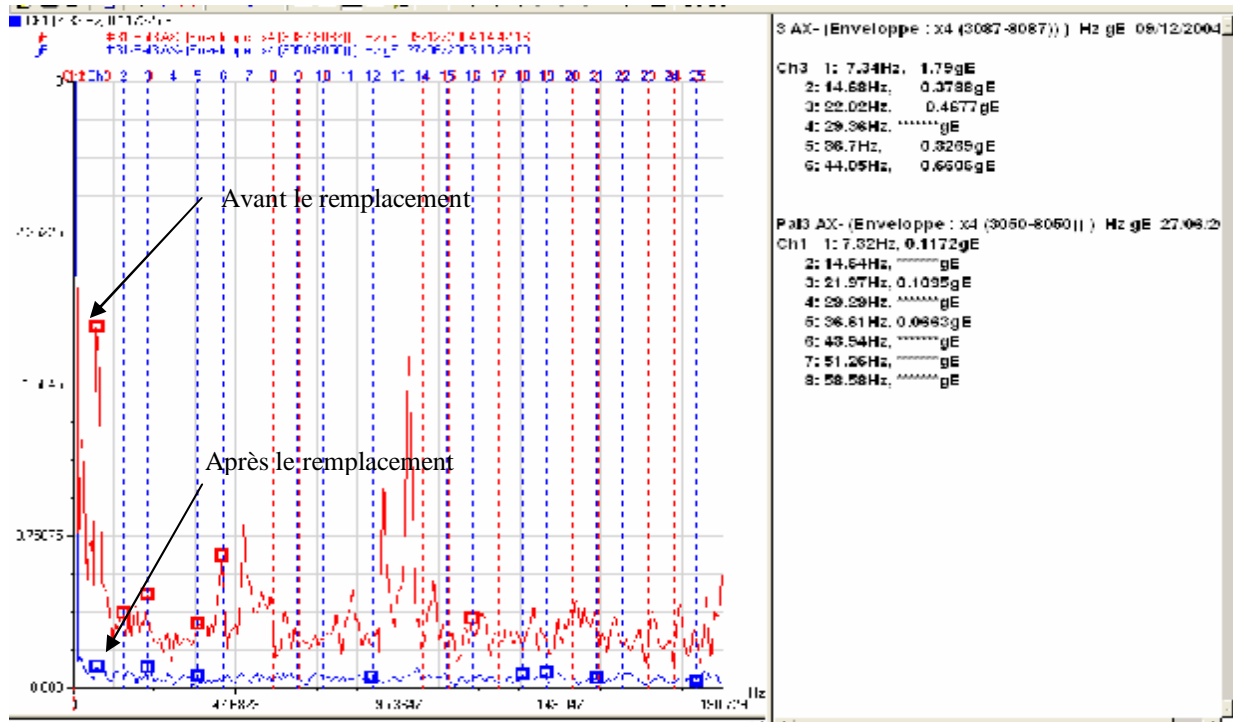


Figure 3-13 : Le spectre enveloppe de la réponse impulsionnelle

### 3-4-2-1- Conclusions

Le signal vibratoire est l'identité de la machine, lié à chaque instant aux conditions de fonctionnement. Pour faire un bon pronostic, il faut passer obligatoirement par l'analyse spectrale pour confirmer le diagnostic, étant donné que l'effet de masque est l'écueil le plus sérieux dans l'analyse en mode global.

### 3-5-Conclusions générales

Il a été montré que le spectre et l'analyse d'enveloppe des signaux d'accélération étaient des indicateurs performants pour détecter les défauts des roulements. Ils permettent notamment de dissocier les types d'écaillage de roulement –bagues, cages ou éléments roulants-. L'état d'un roulement doit être suivi à partir des vibrations mesurées sur le palier où il est logé, car les indicateurs issus de l'enveloppe ne permettent pas le diagnostic à partir d'un palier voisin. Il faut remarquer aussi que le signal vibratoire permet de détecter les problèmes de lubrification (problème couramment posé dans les cimenteries). Lors d'une augmentation de ce paramètre, il suffit de faire un graissage et d'effectuer une nouvelle mesure pour se rendre compte s'il s'agit d'une usure ou d'un simple manque de lubrification.

Désormais, la mise en place d'une étanchéité efficace, l'application de procédures de montage correctes et la mise en application d'une maintenance appropriée sont des facteurs déterminants, ayant une influence directe sur la durée de vie du roulement. Ces aspects doivent être pris en considération avec le même degré d'importance que la qualité intrinsèque du roulement. Ainsi, en appliquant la maintenance conditionnelle, on réduit le nombre et la durée des arrêts dus à des pannes d'une part, et d'autre part, nous augmentons la disponibilité des machines. Par conséquent, nous exploitons pleinement les performance de la durée de survie des roulements, donc, les stockes seront bien gérés et les pièces de rechanges seront disponibles selon les besoins et opérations coûts.



### 3-7. Bibliographie

- [1] D.Nelias : Contribution à l'étude des roulements : Modélisation globale des roulements et avaries superficielles dans les contacts EHD pour des surfaces réelles ou indentées, Dossier d'habilitation à diriger des recherches, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Université Claude Bernard Lyon I, décembre 1999
- [2] A.E.hadjadj, A.Bouzaouit : Etude statistique et vibratoire sur la dégradation des roulements, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2003.
- [3] R. Chaïb, S. Meziani, I. Verzea, Surveillance des roulements par l'analyse vibratoire, Revue Sciences & Technologie B de l'Université de Constantine, N°21, Juin2004.
- [4] SKF, Les outils de la maintenance, 1998
- [5] L.Rasolofondraire : Mise en œuvre des méthodes paramétriques adaptatives pour la surveillance d'une machine de production par analyse vibratoire. Thèse de doctorat de l'université de Reims Champagne- Ardenne. Décembre 95 à Reims.
- [6] J.Morel, Vibration des machines et diagnostic de leur état mécanique. Eyrolles 92.
- [7] SKF : les roulements, technologie, calcul et dimensions, 1980.
- [8] Des forges X. : Méthodologies de surveillance en fabrication mécanique. Application de capteur intelligent à la surveillance d'axe de machine outil, janvier 99.
- [9] P.Arques, Diagnostic prédictif de l'état des machines. Masson 96.
- [11]B.Belmekki, Z. Derouiche : mesure et analyse des vibratoires appliquées à la maintenance conditionnelle, Convention de formation CIFI-TRC, Ain el Turek, ORAN 2000.
- [10] Ph.Poizat : Framatone-Diagnostic, le facteur défaut pour la surveillance des roulements. Maintenance & entreprise N° 458/ janvier - février 93.
- [12] A.Dyson: scuffing- A Review, par 1, tribology international, vol.8, N°2, 1975.
- [13] A.Dyson: scuffing- A Review, par 2, tribology international, vol.8, N°3, 1975.
- [14] T.A.Hariss: an analytical method to predict skidding in thrust-loaded, angular contact ball bearing, ASME journal of lubrication technology vol.93, serie F, n°1, 1971.
- [15] C.Bujoreanu, N.Popinceanu et al. : Étude de la limite de grippage dans les roulements à billes, Actes des journées francophones internationales 1999 de la STF, roulement, Toulouse, mai 1999.
- [16] V.Bordi-Boussouar : Contribution à l'étude de la formation des dégradations de surfaces par fatigue de contact de roulement, thèse de doctorat, université de Poitiers, 1998.
- [17] Bruel et Kjaer vibro : « Analyse spectrale, Interprétation des spectres de roulement, Septembre 2001.

- [18] SKF : assistance technique. Les lubrifiants et les outils SKF. Pour un fonctionnement sans problème, avril 1999.
- [19] A. Boulenger, C. Pachaud, Diagnostic vibratoire en maintenance préventive, Série Génie industriel, Dunod 1998.
- [20] G. Zwingelstein, La maintenance basée sur la fiabilité, guide pratique d'application de la RCM, Hermes, Paris 1996
- [21] Boulenger A., Pachaud C : Surveillance des machines par analyse des vibrations. Du dépistage au diagnostic. Afnor, 2ème Tirage 98.
- [22] R. Chaïb, S. Meziani, I. Verzea, Management de la maintenance conditionnelle. Etude de cas : Surveillance des roulements par l'analyse vibratoire, Buletinul Institutului Politehnic Din Iasi, Tomul XIVIII (LII), Fasc.3-4, 2002, TEXTILE. PIELARIE, Roumanie.
- [23] M. Thomas, F. Lafleur : MEC 763 Techniques de maintenance industrielle, leçon 9 maintenance conditionnelle par surveillance des vibrations, Département de génie mécanique, ETS, été 2003.

## Chapitre 4

# Application de la Maintenance Conditionnelle à un Réducteur planétaire

### 4.1. Introduction

Le monde de l'industrie et le monde des cimenteries disposent de machines et d'installations de plus en plus performantes et complexes. Les exigences de haute sécurité, la réduction des coûts d'exploitation et la maîtrise de la disponibilité des équipements donnent à la maintenance des systèmes un rôle prépondérant. Elle doit permettre de n'intervenir qu'en présence d'éléments défectueux, de minimiser le temps de réparation, et de fournir un diagnostic fiable et facilement interprétable malgré la complexité des équipements. Or, les coûts de maintenance des cimenteries représentent une part particulièrement importante du life cycle cost. (LCC). Aussi l'optimisation de ces coûts est un enjeu majeur dans ce secteur concurrentiel et stratégique dans les secteurs de l'habitat et la construction. L'extraction du ciment représente la partie en amont de cette industrie et à l'opposé, la partie en aval qui est la panne. C'est pourquoi, nous nous intéressons principalement dans cette partie de travail, aux transmissions de puissance mécanique utilisées dans l'industrie du ciment. La maintenance de ces systèmes de transmission occupe un temps relativement important par rapport à leur temps d'utilisation. C'est pourquoi, actuellement la recherche scientifique vise à développer les outils -méthodes et moyens- nécessaires à l'optimisation de la maintenance de tels systèmes [1,2]. Le choix des méthodes de surveillance est conditionné par la nature des installations et des dégradations éventuelles. Il s'agit d'opérations pouvant être réalisées en fonctionnement (mesures de température, surveillance vibratoire ou acoustique, ...) ou menées en différé

(analyse de lubrifiant) nécessitant des arrêts programmés du système. Ce pendant, et jusqu'à une date récente, dans cette industrie, l'entretien des machines et le remplacement des pièces soumises à usure pouvait être envisagés de deux manières : l'attente de la casse (maintenance curative) ou le remplacement à intervalles réguliers (maintenance systématique) [3, 4, 5]. L'attente de la casse n'est plus économique et les interventions systématiques sont souvent inutiles, coûteuses en pièces de rechanges, en main d'oeuvre et en perte de production. Ce pendant, la dispersion de géométrie, l'hétérogénéité des matériaux utilisés ou les surcharges d'utilisation peuvent entraîner des défaillances avant la date optimale prévue [6]. Par conséquent, la sécurité s'impose et devient un paramètre primordial pour l'entreprise. De ce fait, la gestion des pièces de rechange est un aspect essentiel de la gestion de l'entretien. En effet, bon nombre d'entreprises consacrent 15 à 20% de leur budget d'entretien, aux pièces de rechange, sans oublier qu'un manque de pièces de rechange à un moment critique, peut induire des frais directes et indirectes importantes [5]. Ces frais peuvent être liés à la production (arrêt de la machine, perte de production, plaintes de clients...) ou à la maintenance (commandes en urgence, dégâts secondaires...). En plus, lors des arrêts et des remises en services et compte tenu des erreurs humaines inévitables, ces interventions peuvent nuire à la fiabilité [3, 7]. De ce fait, la surveillance et le diagnostic des systèmes mécaniques sont devenus l'une des préoccupations majeurs des industriels.

Afin de minimiser les temps d'immobilisation et de révision, le procédé de maintenance recommandé est celui de la maintenance préventive conditionnelle : maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (niveaux de signaux issus de capteurs, température, mesure d'usure...) révélateur d'un état de dégradation du bien. Ainsi, le système n'est arrêté que lorsqu'il existe une certaine probabilité de défaillance, définie par l'analyse de niveaux d'indicateurs issus de mesures et établis en permanence au cours du fonctionnement.

Les travaux de recherche dans ce domaine ont donc pour objectif de définir une politique de maintenance préventive conditionnelle basée sur l'utilisation d'outils adéquats et adaptés aux systèmes mécaniques. Cette politique de maintenance permettra ainsi à l'équipe de surveillance de diagnostiquer les défauts apparaissant sur le système en fonctionnement et de décider des actions de maintenances nécessaires, figure 4-1.

Parmi les différentes méthodes de diagnostic utilisées, l'analyse vibratoire est la plus usitée en maintenance conditionnelle, en raison des performances croissantes du traitement du signal. Elle nécessite d'analyser et de suivre l'évolution de spectres mesurés en un ou plusieurs points de la machine, afin de cerner l'apparition d'éventuelles raies caractéristiques de défauts

[9]. Ce qui permet aujourd’hui, l’amélioration continue de la disponibilité et de la sécurité par la détection précoce et le suivi de la dégradation des éléments critiques [10].

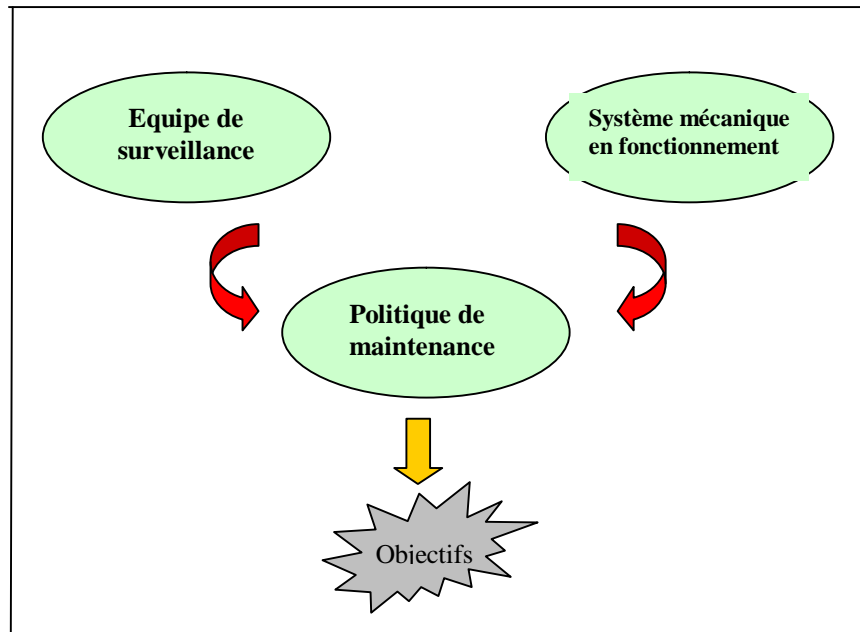


Figure 4-1 : Principe d’une fonction globale d’une politique de maintenance

Cette partie de notre travail a pour objectif la proposition d’une méthodologie générale de gestion de la maintenance dans une entreprise, qui facilitera, à terme, la mise en œuvre du suivi par analyse vibratoire d’une machine de production, voire la détection et le diagnostic des dysfonctionnements des machines vitales complexes, telles que les réducteurs planétaires dans la chaîne de production d’une cimenterie, (figure 4-2). Une intervention à bon escient, en suivant l’évolution dans le temps des symptômes de dérive d’état de l’équipement, est alors possible.

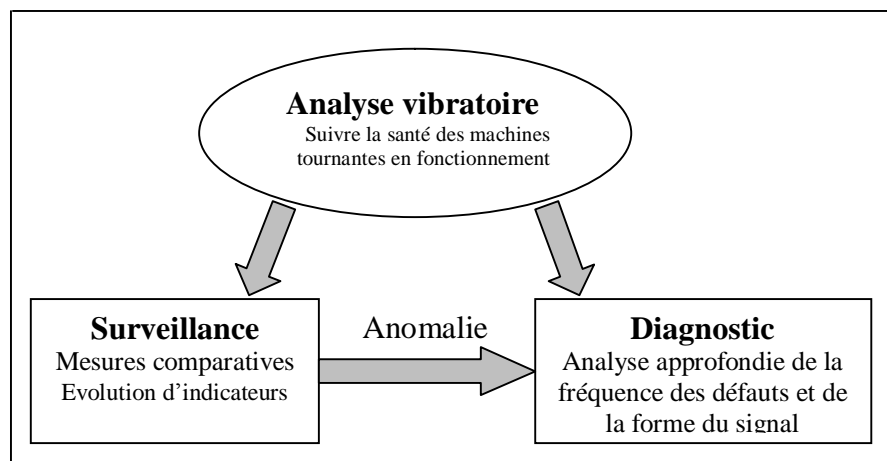


Figure 4-2 : Déroulement d’une analyse vibratoire

Afin d’atteindre cet objectif et en concevant une politique de maintenance préventive, outil générique d’aide à l’élaboration d’un système de diagnostic expert destiné à chaque machine, les travaux doivent être organisés en étapes. Cette politique doit notamment prendre en compte la spécificité du système à surveiller avec ses anomalies probables, les exigences de coûts et de sécurité, les possibilités matérielles concernant les moyens de mesure et de traitement, ainsi que la facilité d’interprétation de l’équipe de surveillance [2]. C’est pourquoi, et afin d’être capable de développer des systèmes de surveillance embarqués efficaces, une démarche rigoureuse doit être entreprise pour définir précisément les relations existantes entre ces éléments. On définit alors les fonctions de service dissociées en fonctions principales et fonctions de contraintes assurées par l’outil à développer, figure 4- 3.

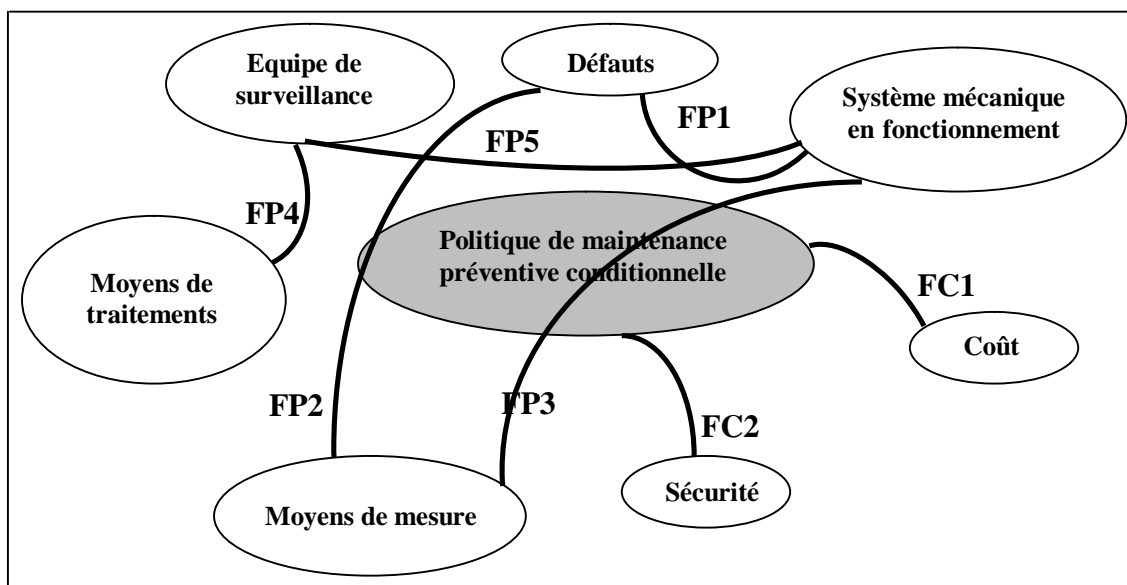


Figure 4-3 : Diagramme pieuvre d’une politique de maintenance préventive conditionnelle

Les différentes fonctions de service des démarches définissant une politique de maintenance préventive conditionnelle sont les suivantes, tableau 4-1.

Tableau 4-1

<b>Fonction principale 1</b>	Identifier les défauts à surveiller sur le système en fonctionnement normal
<b>Fonction principale 2</b>	Définir des moyens de mesure des défauts éventuels
<b>Fonction principale 3</b>	Définir des moyens de mesures intégrales au système en fonctionnement
<b>Fonction principale 4</b>	Définir les moyens de traitements nécessaires et suffisants au diagnostic.

<b>Fonction principale 5</b>	Permettre à l'équipe de surveillance de suivre facilement l'évolution de l'état de système.
<b>Fonction contrainte 1</b>	Définir un système de surveillance le moins onéreux possible.
<b>Fonction contrainte 2</b>	Permettre d'obtenir un diagnostic d'une fiabilité donnée.

**4.2. Présentation de la cimenterie**

Afin d'optimiser les actions de maintenance programmées, tout en tenant compte de la sûreté de fonctionnement, nous avons fait appel à la maintenance basée sur la fiabilité, noté MBF [11, 12]. Parmi les maillons constituant la chaîne de fabrication du ciment, depuis l'extraction du calcaire de la carrière à l'expédition du ciment, figure 4-4, tout en passant par les différents processus et procédés de fabrication, et étant donné l'évolution des relations de cause à effet liant les variables du système, une attention particulière est donnée au réducteur planétaire, équipement stratégique dans le processus de fabrication. Le réducteur planétaire permet de par sa construction coaxiale, une disposition en ligne de l'ensemble du groupe d'entraînement comprenant le broyeur, le réducteur planétaire, le moteur principal et les entraînements auxiliaires avec le moteur électrique, le coupleur hydraulique et le frein du broyeur [13, 14].

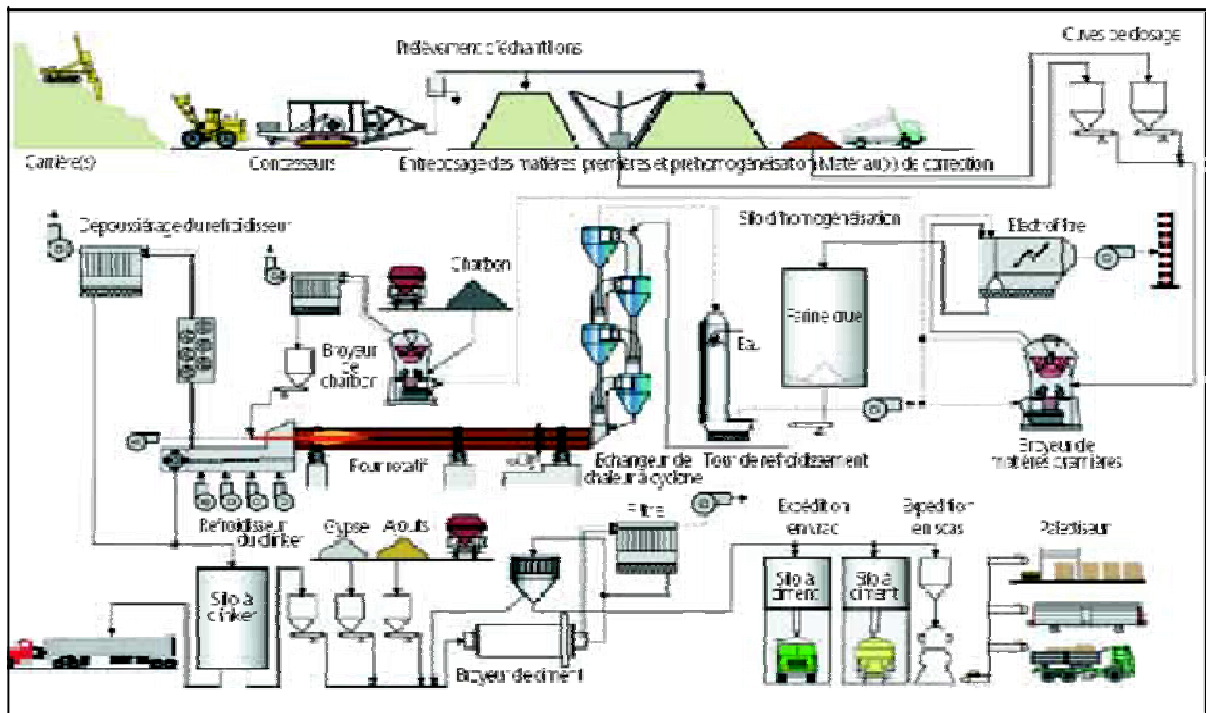


Figure 4-4 : Fabrication du ciment portlant

L'objectif donné était de fournir les éléments nécessaires au suivi du comportement du réducteur planétaire. Il s'agissait de définir les signatures des éléments susceptibles de s'endommager à partir des signaux recueillis sur un système en fonctionnement. Pour mener à bien l'application de l'analyse vibratoire à la cimenterie Hamma Bouziane, un système de surveillance a été mis en application, figure 4-5. La fonction 'santé' d'une machine tournante est basée sur la mise en place d'un ou de plusieurs indicateurs avec des seuils prédéfinis à ne pas dépasser, indicateurs calculés à partir des signaux vibratoires des pièces surveillées. La définition de ces seuils d'intervention est certainement l'une des opérations la plus délicate et la plus importante pour un bon dépistage. Ces seuils prédéfinis, peuvent être fixés en s'appuyant sur des normes (tableau 5), des études statistiques ou des historiques de machines ou par fois encore, en fonction de l'expérience du constructeur. Le dépassement d'un seuil conduit à pratiquer une analyse plus complexe en faisant appel aux outils de diagnostic. Le choix du seuil est fondamental, car avec :

- une valeur trop basse du seuil, des alarmes fréquentes et injustifiées se manifeste ;
- une valeur trop élevée, une panne peut se produire sans alarme préalable.

Les risques de dégradation de machines sont directement liés aux niveaux vibratoires observés. Il faut être très attentif à savoir apprécier à quel moment les risques deviennent pertinents pour que la machine puisse être exploitée correctement avec les performances préconisées. Chaque dépassement génère une alarme dont l'analyse déclenchera des opérations de maintenance. Pour plus de précision, les indicateurs calculés sont définis pour être sensibles à la détection précoce des défauts sur les pièces tournantes. Les vibrations émises par ces machines ou certains organes de ces machines dans leurs formes spectrales ou temporelles, permettent d'extraire des informations permettant de prévoir la détection précoce d'anomalies de fonctionnement, voire l'intervention nécessaire, étant donnée que le signal vibratoire est l'identité de la machine [15]. Il contient sa signature cinématique, liée aux conditions de fonctionnement. Ceci permet de garantir la disponibilité de la machine, en diminuant au maximum les dépenses liées aux achats et opérations d'entretien.

Pour connaître l'état de 'santé' du réducteur planétaire, un système de surveillance a été adopté, utilisant le logiciel Diva Line. Ce logiciel est conçu pour traiter les données de vibrations, recueillies sur les machines tournantes à l'aide de capteurs et permet la comparaison des spectres ainsi qu'une meilleure visualisation des signaux dynamiques. Le préventif appliqué au réducteur consiste à surveiller et analyser de façon continue l'état de fonctionnement ainsi que son évolution dans le temps et de décider les opérations de maintenance nécessaires. Par ailleurs, une précision doit être faite quant au terme de



diagnostic. Il faut en effet dissocier du terme de dépistage. Le dépistage a pour objectif de mettre en évidence l'existence d'une anomalie à un stade précoce et de suivre son évolution sans obligation d'information sur l'origine du dysfonctionnement. Au contraire, le diagnostic doit permettre d'identifier avec précision la nature de l'anomalie et si possible d'en indiquer la gravité.

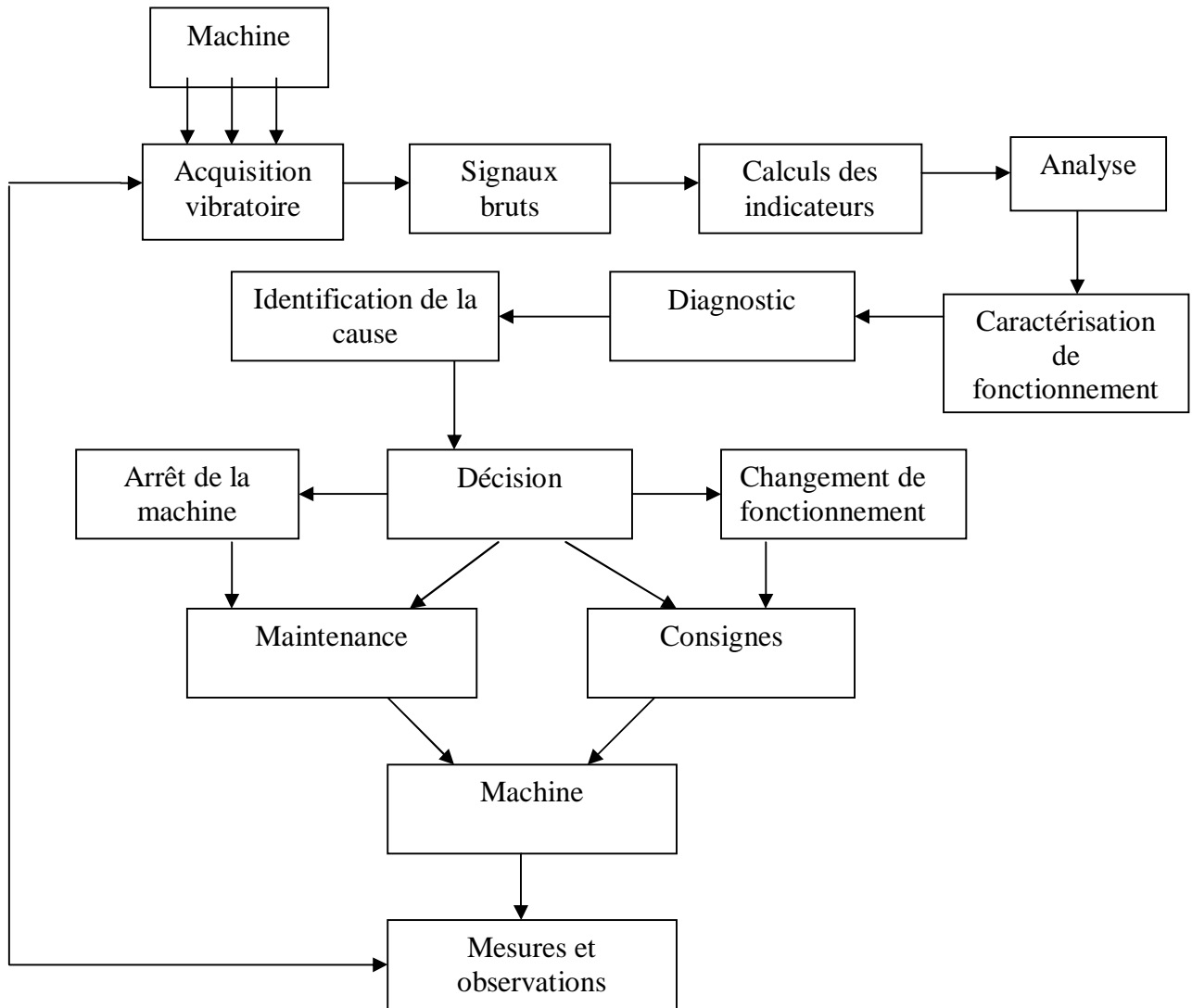


Figure 4-5 : Les différentes étapes de diagnostic d'une machine tournante

#### 4.4. Cinématique du réducteur planétaire

Les trains épicycloïdaux ou planétaires permettent, pour des dimensions réduites, d'assurer des rapports de vitesse et des couples importants. L'axe de rotation des pignons menés, tourne autour de l'axe de rotation de la roue menante, appelée planétaire et les pignons tournants - satellites. Sa cinématique est donnée sur la figure 4-6. Le suivi dans le

temps de l'évolution du niveau vibratoire des machines donne une information beaucoup plus significative d'autant plus que ce niveau dépend beaucoup des conditions d'implantation et d'exploitation de la machine. Le tracé des courbes d'évolution ou des tendances des amplitudes vibratoires doit être complétées par une comparaison des mesures à des seuils d'alarme et de danger, voire la sévérité de la machine.

L'analyse spectrale du signal vibratoire permet d'identifier les fréquences aux vitesses angulaires (pré- spectre) des mécanismes et l'étude cinématique préalable de ces derniers, aide au processus d'identification des anomalies. Les fréquences montrant une variation d'amplitude du signal vibratoire correspondent aux vitesses angulaires des mécanismes en défauts [8, 16].

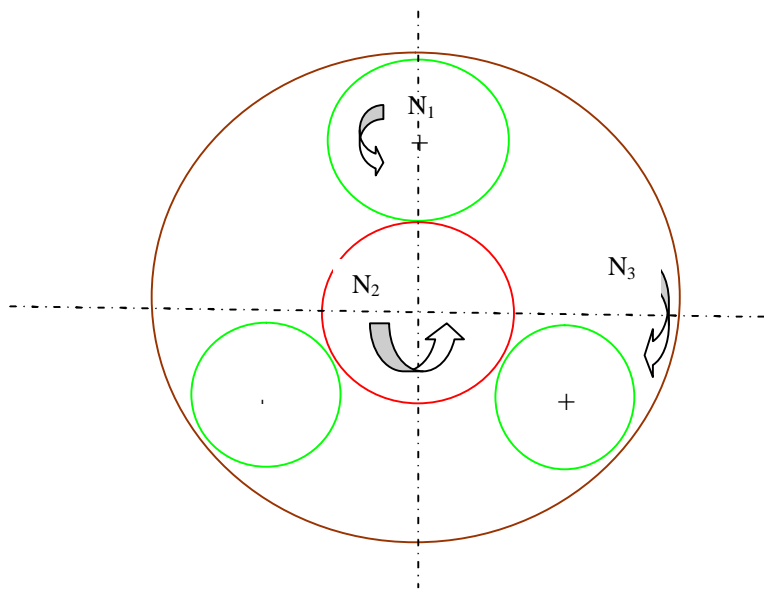


Figure 4-6 : Cinématique du planétaire

Dans les tableaux 1 et 2 nous donnons les caractéristiques cinématiques du réducteur et les fréquences caractéristiques.

Tableau 1 : Caractéristique du réducteur

Désignation	1 <sup>e</sup> train	2 <sup>ème</sup> train
Vitesse d'entrée, $N_1$ (tr/min)	980	93.92
Vitesse d'une porte satellite, $N_4$ (tr/min)	93.92	15.23
Vitesse de rotation d'un satellite, $N_2$ (tr/min)	210.10	37.03
Nombre de dents du pignon, $Z_1$	23	24
Nombre de dents d'un satellite, $Z_2$	97	51
Nombre de dents de la couronne, $Z_3$	217	124
Nombre de satellites, n	3	3

Tableau 2 : Fréquences possibles

Désignation	1 <sup>e</sup> train	2 <sup>ème</sup> train
Vitesse d'entrée $F_1$ (Hz)	16.33	1.56
Vitesse de sortie $F_4$ (Hz)	1.565	0.253
Vitesse de rotation d'un satellite $F_2$ (Hz)	3.301	0.617
Défaut d'engrènement, $Z_3 F_4$	339.605	31.372
Défaut sur le pignon, $F_2 Z_3/Z_1$	44.296	3.921
Défaut sur un satellite, $2 F_4 Z_3/Z_2$	7.002	1.230
Défaut sur la couronne, $n F_4$	4.695	0.759

#### 4.4.1. Le matériel utilisé

Le matériel utilisé est constitué principalement d'un collecteur de données, appelé « movilog 2 », performant grâce à la liaison à un ordinateur équipé d'un logiciel appelé « Diva » spécialement conçu pour une gestion informatisée basée sur le traitement des signaux émises par les différents types des vibrations engendrées par les différents organes d'une entité. Ce type d'appareil est spécialement conçu pour la maintenance conditionnelle et prédictive d'un parc machines et en particulier les machines tournantes à partir d'opérations simples et rapides. Installés à demeure sur les machines, ils assurent une surveillance permanente en comparant l'intensité vibratoire de la machine, mesurée à deux seuils indépendants préréglés. Les relevées vibratoires de fonctionnement sont réalisées grâce aux capteurs « accéléromètres ».

##### 4.4.1.1. Le collecteur de donnée

C'est un appareil portable qui mesure les vibrations, figure 4-7, présente une synthèse très avancée des recherches, notamment en informatique et en électronique de pointe [17]. Son objectif est de collecter les mesures des niveaux vibratoire de la machine en fonctionnement dans le temps. Chaque mesure est rattachée aux caractéristiques de l'équipement étudié, conditions d'exploitation et au type de descripteur utilisé (temporel, spectral, cepstral, etc.) garantissant ainsi l'enrichissement continu et l'enchaînement des différentes mesures. Par conséquence, l'analyse sera faite en utilisant une véritable base de donnée. Cet instrument peut être utilisé comme :

- collecteur de donnée ;
- Analyseur, enregistreur et intégrateur pour le diagnostic ;
- Equilibreur pour le réglage sur site.



**figure4-7 : Collecteur de données**

#### **4.4.2. L'étude du réducteur planétaire**

Vu les constatations (changement du rythme de fonctionnement du réducteur) signalées par les ouvriers travaillant sur la chaîne de production du ciment. Un système de surveillance a été adopté et pour avoir beaucoup plus d'informations sur le réducteur, nous avons fait une comparaison entre les deux réducteurs, celle de la cimenterie de Hamma Bouziane et celle de Tébessa qui sont identiques et travaillent dans les mêmes conditions. Vu le manque de documentation et l'absence totale du fichier historique de l'installation, on a utilisé comme référence vibratoire, la signature vibratoire du réducteur de la cimenterie de Tébessa. On voit que le niveau vibratoire du réducteur de la cimenterie de Tébessa est très bas malgré que les mesures ont été relevé trois mois plus tard (04/01/2003) par rapport à celui de la cimenterie Hamma Bouziane de Constantine (29/10/2002). Ce qui nous laisse dire qu'une dégradation du réducteur se trouvant à la cimenterie Hamma Bouziane est probable, bien que son niveau vibratoire reste inférieur aux normes, figure 4-8. Ce qui nous a amené à étudier le réducteur planétaire se trouvant à la cimenterie Hamma Bouziane et à suivre son état de santé dans le temps.

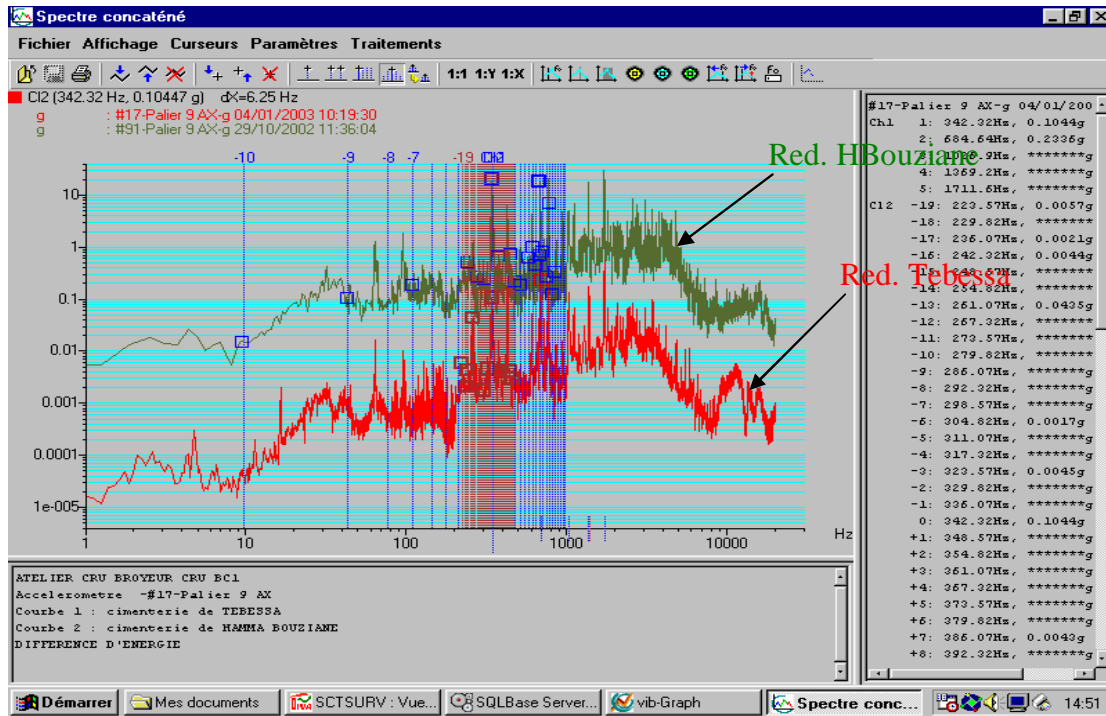


Figure 4-8 : Comparaison des niveaux de tendance

#### 4-4-3- Configuration des points de mesure

Concernant les mesures porteuses d’indicateurs d’endommagement, une attention particulière doit être portée sur le choix des points de mesure. En effet, on cherche à évaluer un comportement interne à la machine. De ce fait, le capteur devra être le plus sensible et en relation directe avec ‘l’intérieur’ afin de récupérer le maximum d’informations. Or, les points de mesures idéaux sont situés au plus près des organes à surveiller. C’est pourquoi un intérêt tout particulier est porté aux paliers, car, ils constituent le chemin de passage privilégié pour les vibrations [18]. Ils représentent en effet, un point clé, car ils sont le seul lien matériel permettant la transmission des vibrations, images des efforts dynamiques, de la machine tournante. Donc les mesures doivent être faites en ces endroits de la machine. Ce pendant, il faut remarquer que la taille de certaines machines et/ou l’accessibilité de certains endroit rendent difficiles voire impossibles les prises de mesures au plus près des pièces à surveiller. Toutes les techniques informatiques récentes, bien que de plus en plus performantes, sont tributaires de la qualité du signal analysé et donc du positionnement du capteur de mesures. Donc, pour mieux cerner le problème constaté et identifier l’organe défectueux du réducteur, voire l’action de maintenance appropriée, en plus des paliers, d’autres points ont été sélectionner à des endroits susceptibles de donner le maximum d’information sur le comportement vibratoire du réducteur. Au total, nous avons configuré sept points de mesures pour évaluer le comportement du réducteur, figure 4-9, à savoir :

- le 1<sup>er</sup> point, se trouvant entre le moteur et l'accouplement ;
- le 2<sup>eme</sup> point, se trouvant entre l'accouplement et le réducteur ;
- le 3<sup>eme</sup> point, à l'entrée du réducteur, coté bacha à eau ;
- le 4<sup>eme</sup> point, à l'entrée du réducteur, coté BCII ;
- le 5<sup>eme</sup> point, à la sortie du réducteur, coté bacha à eau ;
- le 6<sup>eme</sup> point, à la sortie du réducteur, coté BCII ;
- le 7<sup>eme</sup> point, entre le réducteur et le broyeur.

La vibration étant le résultat d'un effort, sa mesure principale devra se faire suivant la direction de l'effort. Dans le cas des machines tournantes qui est notre cas, le plus part des efforts sont engendrés par la partie mobile, donc eux même sont tournants, par conséquent les mesures principales devront se faire dans le plan radial. Si l'effort est généralement constant dans ce plan, il n'en est pas de même concernant la réponse de la structure. En plus, les mesures sont en général différentes suivant les rayons, ce qui impose de faire aux moins deux mesures : une verticale et une horizontale. Il faut noter aussi que la raideur horizontale est souvent plus faible, c'est pourquoi, la mesure dans cette direction est plus importante. Cependant, il faut remarquer qu'en fonctionnement normal, les efforts axiaux sont pratiquement inexistant, mais l'apparition de ceux ci est un signe de détérioration, donc la mesure axiale s'impose. En conséquence, la mesure est prélevée dans chaque points suivant les trois directions perpendiculaires entre elles (verticale, horizontale et axiale). La grandeur de mesure utilisée est la vitesse vibratoire efficace, recommandée par les différentes normes à savoir AFNOR E 90-100, ISO 2954, et la norme DIN 45 666.

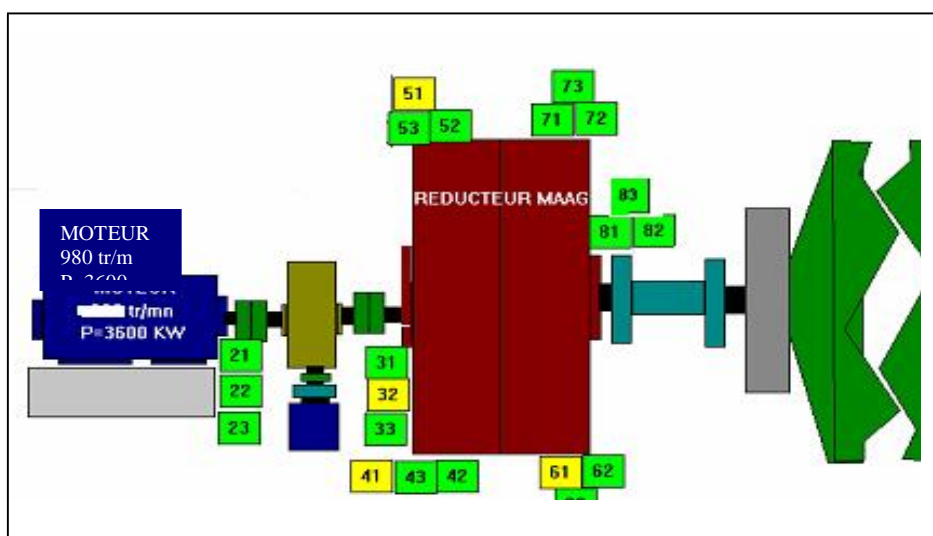


Figure 4-9 : schéma synoptique et points de mesure

#### 4-5-interprétation et discussion des résultats

##### • Le premier point 3

Dans ce point, Le suivi dans le temps de l'évolution du niveau vibratoire nous donne des informations significatives. On constate l'évolution de la vitesse de l'arbre GV du point 3 dans la direction axiale, figure 4-10. Elle relève une brutale augmentation du niveau global vitesse sur la période septembre- octobre 2001, qui atteint les deux composantes 11,371 mm/s et 11,486 mm/s, donnant une première idée sur le changement de fonctionnement de l'équipement. Donc une dégradation de l'équipement est fort probable. Ce dépassement de seuil laisse présumer que la machine est affectée de défaut, voire modification des fréquences, signe de détérioration.

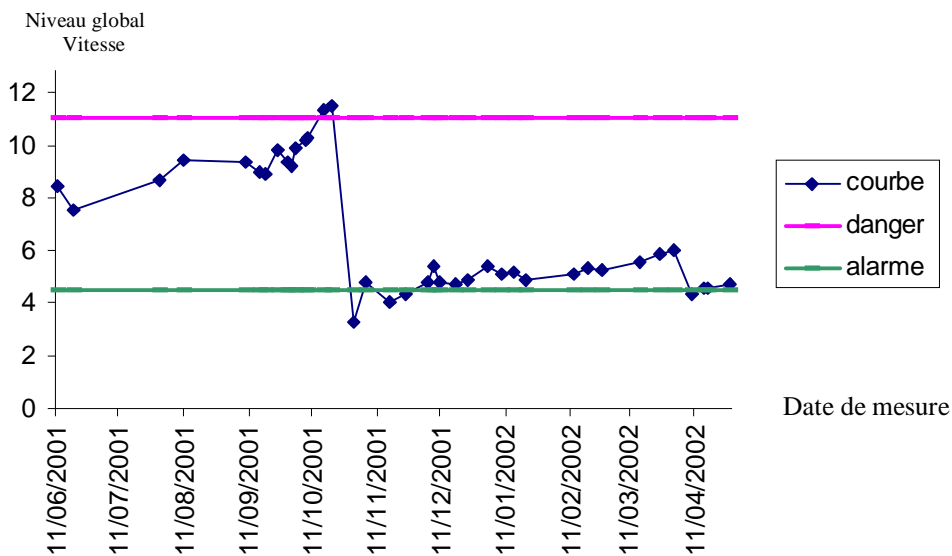
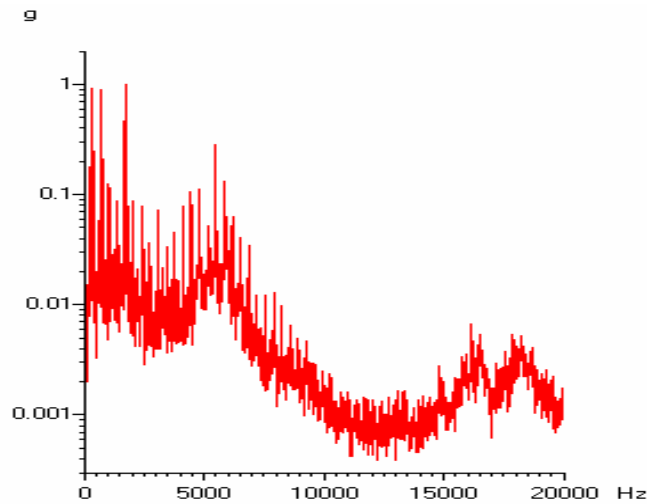


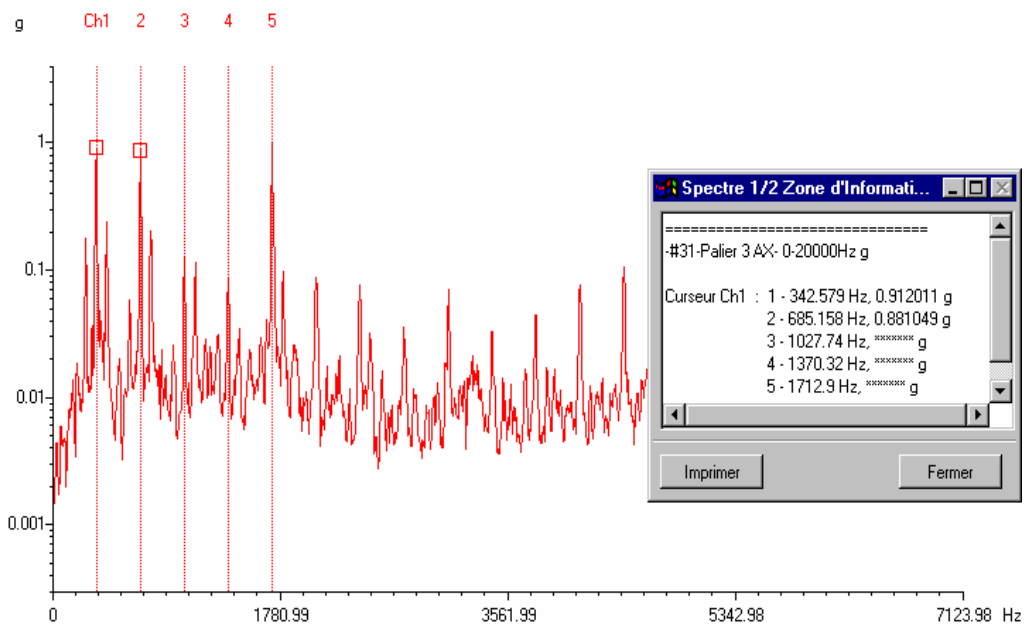
Figure 4.10 : La tendance du point 31

L'analyse en fréquence permet d'identifier la provenance du défaut. La présence d'une telle avarie, entraîne l'augmentation de l'amplitude du signal à la fréquence d'engrènement et ses harmoniques, même en présence d'autres défauts [2]. Les figures 4-11, 4-12 et 4-13 représentent clairement l'image vibratoire du point 3 dans la direction axiale dans la gamme fréquentielle [0, 20000] Hz avec le niveau global d'accélération g.



**Figure 4-11 : Spectre du point 31 (échelle logarithmique)**

La fréquence de la couronne du premier train obtenue, est égale à 342.579 Hz avec un pic de 0.91201g. Le pic de la deuxième harmonique de cette fréquence est de 0.881049g (figure 4-12).



**Figure 4-12 : La représentation des harmoniques du point 31 (échelle logarithmique)**

Pour une analyse spectrale, les pics les plus importants sont visibles à l'échelle linéaire, dont les valeurs sont données sur la figure 4-13.



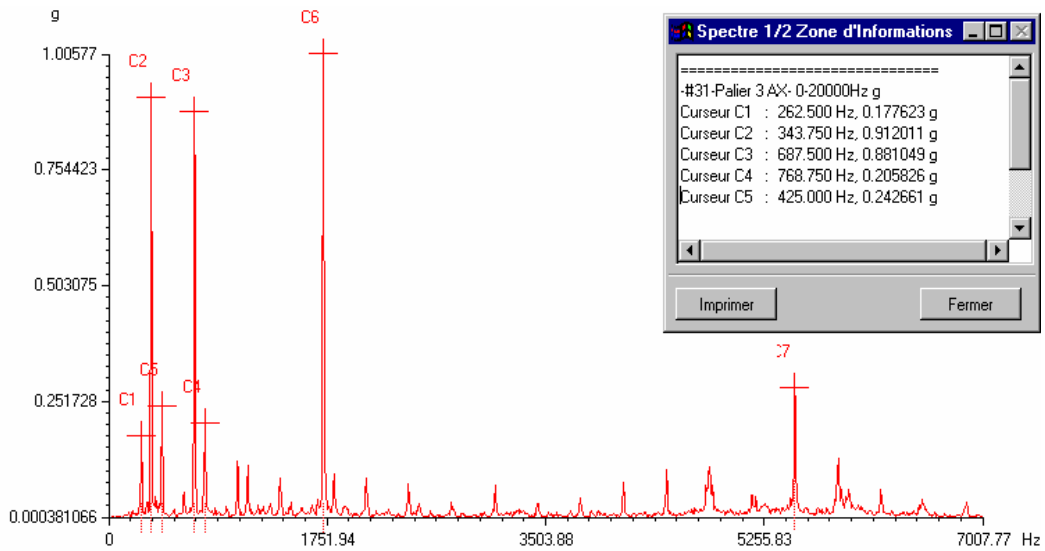


Figure 4-13 : La représentation des harmoniques du point 31 (échelle linéaire)

Dans le spectre (figure 4-12), la même augmentation de l'amplitude de la troisième fréquence  $C_3$  est à noter avec une valeur de 0.881049g qui correspond la fréquence du 2<sup>ème</sup> harmonique du spectre précédent (figure 4-11). Cette analyse permet de confirmer un défaut dans le pignon solaire. Après le changement de cet élément, on observe une nette diminution du niveau global vitesse à la valeur 3.24 mm/s.

Par contre, sur les figures (4-14), (4-15), (4-16), (4-17) et (4-18), représentant respectivement les points (2, 4, 5, 6 et 7), on constate que l'indicateur du niveau global vitesse reste stable et donc l'état vibratoire est supposé bon.

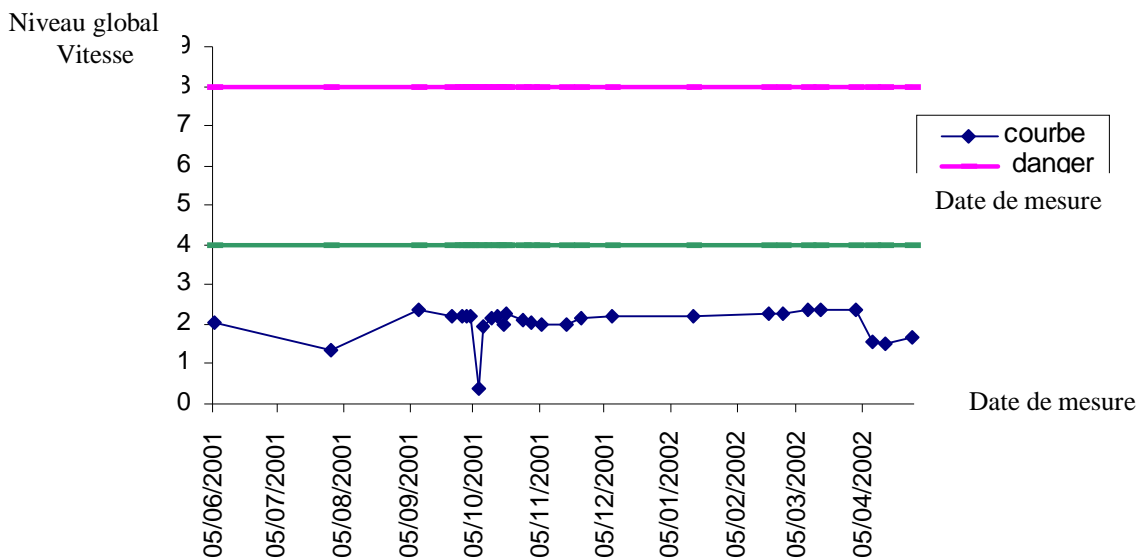


Figure 4-14 : la tendance du point 73

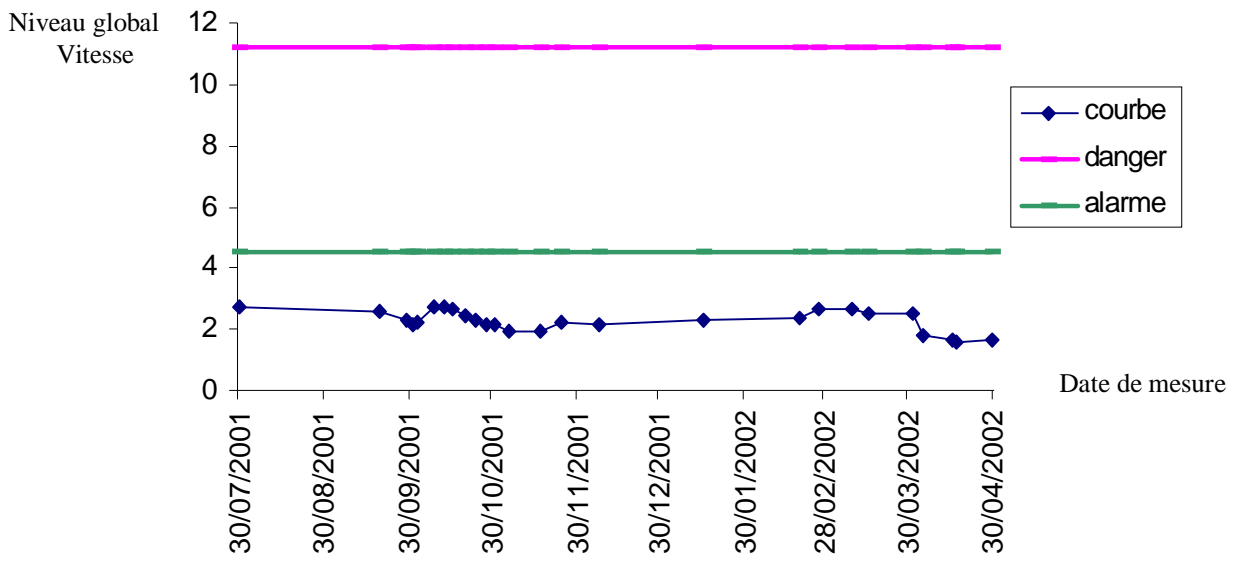


Figure 4-15 : la tendance du point 53

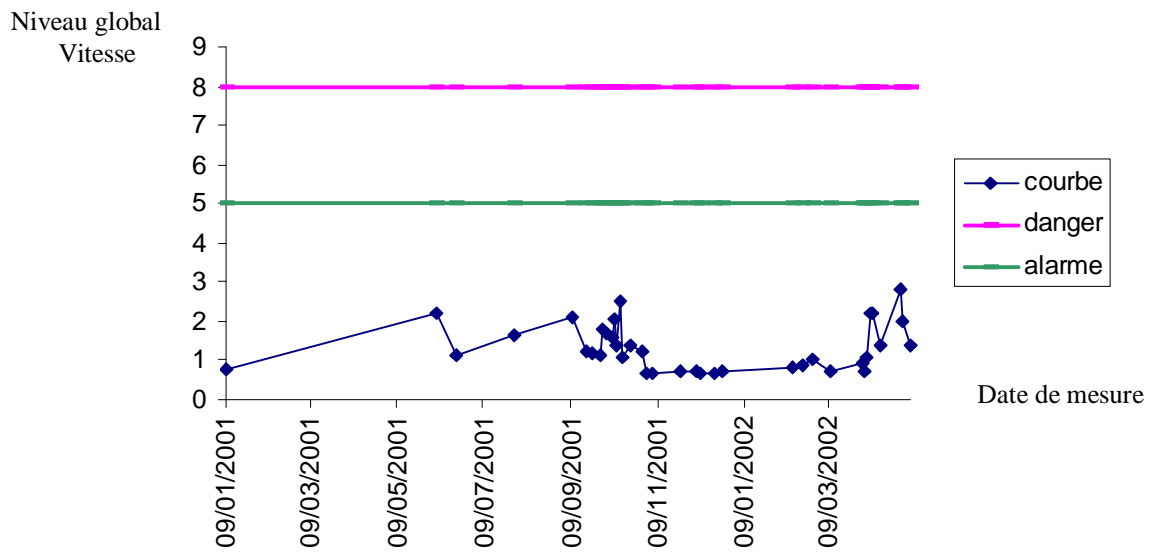
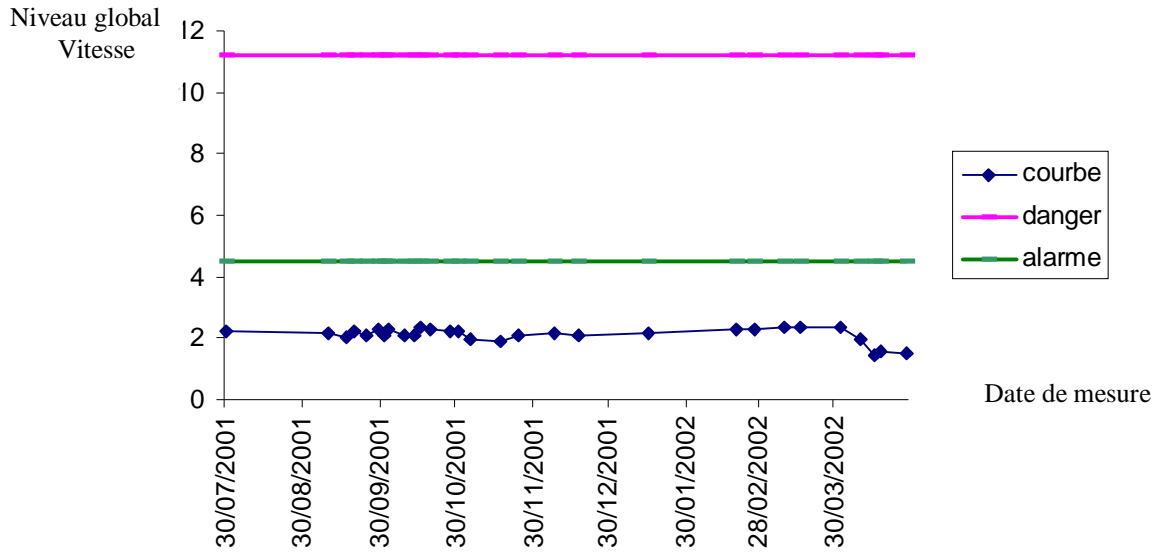
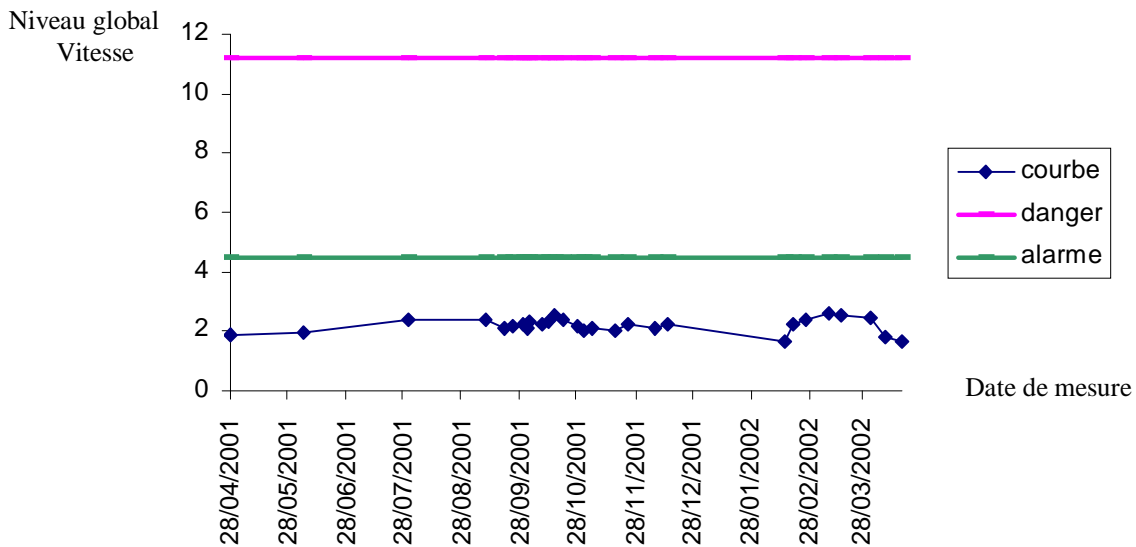


Figure 4-16 : la tendance du point 22



**Figure 4-17 : la tendance du point 43**



**Figure 4-18 : la tendance du point 63**

La mesure en niveau global (figures (4-10), (4-14), (4-15), (4-16), (4-17) et (4-18)) montre l'intérêt que présente le stockage des données et leur représentation sous forme de diagramme d'évolution. Elle permet, en se rapportant à des références connues (normes, spécifications du constructeur, des mesures antérieures, etc.), de quantifier un état général d'une machine tournante et de juger si le niveau de vibration est acceptable. Dans le cas contraire, il est important d'en définir la raison et chercher le phénomène excitateur. Cette

mesure permet de détecter la présence d'un défaut, mais ne permet pas de détecter la source du défaut. Par contre l'analyse spectrale (figures 4-11, 4-12 et 4-13) permet de déterminer non seulement l'importance de l'anomalie mais aussi sa nature et de suivre son évolution dans le temps. Donc, elle permet de fournir au personnel concerné, non seulement des informations sur le comportement vibratoire instantané, mais donner également des informations sur la tendance des phénomènes et de l'apparition du défaut, voire l'identification de la provenance du défaut

Donc, d'après cette étude, dans le cadre de la surveillance et avec les diagrammes d'évolution, on assiste à un vieillissement prématuré du réducteur. De ce fait, il devient donc plus vulnérable et donc plus sujet à être défaillant.

#### **4-6- Conclusion**

On constate qu'après le changement du pignon dans le réducteur, après le défaut signalé durant la période septembre- octobre 2001, l'allure de la courbe de tendance du point 31 (figure 4.10) s'est stabilisée. A partir de cette période, les mesures relevées sur les points configurés sur le réducteur et la comparaison des pics des spectres avec les seuils d'alarme niveau global vitesse (figures 4-14, 4-15, 4-16, 4-17 et 4-18), n'ont exprimé aucune valeur d'amplitude dépassant les valeurs de seuils. L'examen de toutes ces figures montre le rôle essentiel que joue le traitement du signal dans l'identification d'un défaut. Ce travail valide bien la performance de l'analyse vibratoire dans les travaux de gestion de la maintenance. Cependant, son efficacité dépend en grande partie de l'analyse et de l'interprétation des fréquences ainsi que de l'évolution des amplitudes et surtout de l'utilisation et de la maîtrise des outils spécifiques. Il faut remarquer que ce type de suivi est simple, rapide et peu onéreux. En mettant en application la maintenance conditionnelle, l'entreprise se prépare pour l'application de la maintenance prévisionnelle ainsi que pour la gestion prévisionnelle des données de l'analyse vibratoire, pour son parc machines et en particulier ses machines clés de la production.

**Bibliographies**

- [1] S.Teyar, Diagnostic de l'état des machines tournants par l'analyse vibratoire. Thèse de Magister, Université Mentouri Constantine, 2003.
- [2] C.Breneur, Eléments de maintenance préventive des machines tournantes dans le cas de défauts combinés d'engrenages et de roulements, Doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Lyon (MEGA), 2002.
- [3] A.Tomache, Communication SME-ERCE, Symposium sur la maintenance industrielle, AEID-IAP. Alger, 21÷ 23, janvier 2001
- [4] S.Elfezazi et al. Vers un outil, basé sur l'analyse fonctionnelle, pour la mise en œuvre des indicateurs de mesure de performance de la fonction maintenance. Revue française de gestion industrielle. Vol.22, N°3/2003.
- [5] L.Gelders et al, la gestion des pièces de rechange et la sous-traitance : quelques directives pratiques, Revue Française de gestion industrielle, Vol.22, N°3.
- [6] A.Orantes Molina, Méthodologie pour le placement des capteurs à base de méthodes de classification en vue du diagnostic, Doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2005.
- [7] A.Boulonger, C.Pachaud, Diagnostic vibratoire en maintenance préventive, Dunod, Paris 1988.
- [8] X.Des Forges, Méthodologie de surveillance en fabrication mécanique : Application de capteur intelligent à la surveillance d'une machine outil. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, janvier 99.
- [9] F.Bogard, K.Debray, Y.Q.Guo, A.Pavan, Numerical methodology to easily detect defects in revolving machines by vibration analysis, ELSEVIER, Mécanique & industries 3(2002)79-87.
- [10]Projet MQTM, Fiabilité- qualité : La maintenance systématique.
- [11] I.Versea, M.Cabriel, D.Richet, MBF globale, une étape stratégique vers la TPM. Revue française de gestion industrielle, vol 18, N°2, Paris 1999.
- [12] J.P. Souris, Les méthodes et outils de la maintenance, fiabiliser au moindre coût, maintenance N°519, avril 1999.
- [13] Instruction de service pour réducteur planétaire MAAG, type CPU (manuel), ERCE, Cimenterie Hamma Bouziane, Constantine- Algérie.
- [14] H.Heguib. Influence de l'environnement sur la durée de vie d'un réducteur planétaire : conditions Hamma Bouziane. Thèse de Magister, Université Mentouri Constantine, 2003.

- [15] M.Glade, I.Yves longère, P.Lyonnet, Impact de l'utilisation d'un système de surveillance des défaillances sur les coûts d'exploitation et de maintenance des mécaniques d'hélicoptère. Revue Française de gestion industrielle. N° Spécial Maintenance, Mars2003.
- [16] M. Thomas, F. Lafleur, Maintenance conditionnelle par surveillance des vibrations. Département de génie mécanique, ETS, été 2003.
- [17] Metravib. Instruments, Système de surveillance vibratoire et de maintenance prédictive des machines : la nouvelle génération, Revue maintenance février 1989.
- [18] S. Meziani, S. Teyar, H. Heguib, R. Chaïb, Diagnostic de l'état des machines tournantes par l'analyse vibratoire, 1<sup>er</sup> Congrès International d Mécanique – Constantine, CIMC'02, 14,15 et 16 décembre 2002

## **Conclusions et perspectives**

La production industrielle évolue dans un contexte de plus en plus sévère, surtout en ce qui concerne la qualité, la sécurité et les nuisances. Par conséquent, l'outil de production doit faire l'objet d'une maintenance efficace. De plus, dans le contexte concurrentiel actuel économique, la réduction des coûts de production est devenu la clé du développement et de la survie de l'entreprise. Hormis, la réduction des coûts de maintenance et l'augmentation des taux de disponibilité des équipements constituent un enjeu vital pour toute entreprise. Des pannes catastrophiques inattendues entraînent à la fois des pertes de production et des factures de réparations très élevées, compte tenu des erreurs humaines inévitables lors des arrêts et remises en service. C'est pourquoi les pannes et les incidents des systèmes de production sont devenus l'un des fléaux majeurs de l'industrie. L'indisponibilité des machines vient amputer lourdement la capacité de production et donc accroître le prix de revient.

De ce fait, dans le monde industriel contemporain, la surveillance et le diagnostic des machines ont connu d'important développement ces dernières années, surtout pour les machines stratégiques ou équipements vitaux, sélectionnés comme critique par leur influence sur la sécurité, sur la qualité et par leur impact sur le flux de production, ce qui permet de répondre à des impératifs tels que la diminution des coûts de maintenance, la conservation du capital machine, la maîtrise totale de la disponibilité de l'outil de production, de ces coûts d'exploitation, de la qualité des produits fabriqués et la sécurité des équipements. Pour l'utilisateur, ces possibilités nouvelles offrent des diagnostics plus sûrs, plus économiques et plus rapides. Par conséquent, disposer de machines de plus en plus performantes, avec une fiabilité maximale.

C'est pourquoi, les résultats trouvés permettent de dégager des conclusions plus générales concernant le suivi du comportement pertinent des machines tournantes, en particulier les roulements et les réducteurs planétaires. L'objectif donné pour ces travaux était de fournir les éléments nécessaires au suivi du comportement pertinent des machines tournantes pour l'industrie. Il s'agissait de définir les signatures des éléments les plus susceptibles à l'endommagement, roulements et engrenages, à partir des signaux recueillis sur un système de fonctionnement. Les mesures choisies en été les accélérations et des vitesses aux

paliers, et aux endroits les plus sensibles pour permettre de cerner au mieux les problèmes pertinents et bien évaluer le comportement des machines. La connaissance de l'influence des défauts sur les signaux, à partir du traitement du signal adopté a permis de définir des indicateurs efficaces pour la surveillance des défauts à caractère impulsionnel et en particulier les roulements.

A cet effet, une démarche de diagnostic a été établie. Sa forme serait adaptable à n'importe quel équipement, et en particulier les machines tournantes. L'essentiel est de retenir que la surveillance des roulements est une priorité, surtout pour les machines clés, étant donné que la qualité des roulements est un facteur essentiel pour disposer des meilleures performances.

Un banc d'essai a été monté pour caractériser le comportement des roulements en fonctionnement. Plusieurs conditions de fonctionnements ont été testées. Il s'est avéré que pour mieux appréhender le comportement des roulements, seules les hautes fréquences sont à considérer. D'autre part, il a été montré que le suivi de chaque roulement nécessitait un seul accéléromètre par palier à surveiller, à condition de faire le bon choix de l'emplacement des points de mesure, voire le capteur de mesure « dans notre cas l'accéléromètre ».

Concernant les défauts de roulements, il a été montré que le kurtosis est un indicateur performant pour la surveillance et en particulier la surveillance de chocs périodiques à caractère impulsionnel « les roulements », à condition d'avoir une bonne qualité de mesure. Il faut remarquer aussi que l'état de comportement d'un roulement doit être suivi à partir des vibrations mesurées sur le palier où il est logé. Désormais, la mise en place d'une étanchéité efficace, l'application de procédures de montage correctes et la mise en application d'une maintenance prometteuse sont des facteurs déterminants, ayant une influence directe sur la durée de vie des roulements. Ces aspects doivent être pris en considération avec le même degré d'importance que la qualité intrinsèque des roulements. Ainsi nous réduisons le nombre et la durée des arrêts dus à des pannes d'une part et nous augmentons la disponibilité des machines d'autre part et par conséquent exploitons pleinement les performances de la durée de survie des roulements.

Une deuxième application de l'analyse vibratoire a été réalisée à la cimenterie Hamma Bouziane où on assistait à un vieillissement prématuré du réducteur planétaire. Il devient donc plus vulnérable et donc plus sujet à être défaillant. Par conséquent, il nous faut nécessairement faire du diagnostic, de la surveillance, de la prévention donc de la maintenance conditionnelle afin d'améliorer la fiabilité du système dans son ensemble. Pour répondre à ces impératifs, la première remarque a été de ne plus combattre les effets, mais de traiter les causes. Ceci



implique donc, que le remplacement systématique du matériel doit progressivement disparaître sauf pour du petit matériel peu coûteux (graissage, filtres, joints, petites pièces, etc.) d'une part et que l'auscultation périodique par démontage partiel ou complet (encore très répondue) doit disparaître et céder la place à des méthodes de maintenance conditionnelle d'autre part.

Une démarche de diagnostic a été établie pour rechercher toutes les informations utiles pour tirer un diagnostic correct sur son état mécanique.

Les principales retombées industrielles de ces travaux permettent d'une part, à répondre à des impératifs tels que la diminution des coûts liés aux achats et opérations d'entretien de maintenance, à conserver le capital machine ainsi que l'augmentation de la disponibilité et la sécurité des équipements, en particulier les équipements stratégiques. D'autre part elles permettent à l'utilisateur de disposer d'un outil efficace particulièrement adapté à la surveillance de chocs périodiques et à la quantification du signal à caractère impulsionnel, afin de réduire les coûts de maintenance et ne changer que les composants qui ont atteint leur potentiel de vie.

Il faut remarquer aussi que le volet diagnostic de la panne est aussi à exploiter : La technologie de groupe permet de réduire le temps d'analyse de panne en essayant de chercher des similitudes avec des cas déjà rencontrés. Cette pratique diminuera le temps de diagnostic et le risque d'erreur.

Finalement, cette thèse ouvre la voie à un ensemble de sujets et devrait servir à l'avancement des connaissances dans le domaine de la gestion de la maintenance.

### **Recommandations**

Ce type de maintenance devra s'étendre à la plupart des entreprises de production et d'exploitation. Les exemples de succès sont nombreux et l'intérêt de pouvoir détecter rapidement les anomalies, sans même devoir ausculter l'équipement. Ainsi, que de pouvoir prévenir la panne et en prévoir la réparation en temps opportun, tout en tenant compte des impératifs de production, de la pièces de rechange et de l'équipage d'intervention.

## Liste des figures

Figure 1-1 : La vidange d'un véhicule .....	8
Figure 1-2 : Remplacement systématique des roulements. ....	9
Figure 1-3 : Différents types de maintenance.....	14
Figure 1-4 : Maintenance corrective.....	15
Figure 1-5 : Maintenance systématique.....	16
Figure 1-6 : Les enjeux d'une défaillance.....	19
Figure 1-7 : Rôles des services production et maintenance .....	20
Figure 1-8 : Cycle d'utilisation d'un matériel.....	21
Figure 1-9 : Les causes de défaillance.....	22
Figure 1-10 : Les différents processus de dégradation des pièces.....	23
Figure 1-11 : Les différents phases de la vie d'un composant.....	24
Figure 1-12 : Durée de vie des composants « courbe en baignoire.....	25
Figure 1-13 : Relation causes effets d'une machine.....	26
Figure 1-14 : L'évolution des différents paramètres et seuils dans le temps.....	27
Figure 1-15 : Traitement d'un matériel défaillant.....	28
Figure 1-16 : Chemin logique de la mise en œuvre d'une machine.....	30
Figure 1-17 : Les différents paramètres utilisés en maintenance conditionnelle.....	32
Figure 2-1 : Mesure d'une vibration.....	40
Figure 2-2 : Description du signal vibratoire.....	42
Figure 2-3 : représentation d'un signal harmonique.....	43
Figure 2-4 : représentation d'un signal non harmonique et ses composants.....	44
Figure 2-5 : : représentation d'un signal aléatoire.....	45
Figure 2-6 : Schéma de principe d'un analyseur FFT .....	48
Figure 2-7 : Principe de l'analyse vibratoire des machines tournantes.....	51
Figure 2-8 : Relation accélération, vitesse et déplacement.....	52
Figure 2-9 : Mesure du niveau globale.....	54
Figure 2-10 : représentation spectrale ou fréquentielle d'un signal.....	55
Figure 3-1 : Remplacement systématique des roulements.....	64
Figure 3-2 : Courbe de fiabilité ( $L_{10}$ d'après SNR).....	64
Figure 3-3 : Constitution générale d'un roulement.....	65
Figure 3-4 : Processus de dégradation d'un roulement.....	69
Figure 3-5 : Techniques de surveillance des roulements.....	72
Figure 3-6 : Evolution du facteur crête en fonction de l'évolution d'un défaut de roulement.....	74
Figure 3-7 : Signal vibratoire d'un roulement.....	75
Figure 3-8 : Dispositif expérimental.....	76
Figure 3-9 : Variation du kurtosis longitudinal en fonction du temps.....	77
Figure 3-10 : Variation du kurtosis vertical en fonction du temps.....	77
Figure 3-11 : Tendance du défaut de roulement dans le temps.....	79
Figure 3-12 : Evolution du spectre dans le temps.....	79
Figure 3-13 : Atténuation de la valeur du spectre dans le temps.....	80
Figure 3-14 : Spectre enveloppe de la réponse impulsionnelle.....	80
Figure 3-15 : Destruction de la cage du roulement.....	81

Figure 4-1 : Principe d'une fonction globale d'une politique de maintenance.....	86
Figure 4-2 : Déroulement d'une analyse vibratoire.....	86
Figure 4-3 : Diagramme pieuvre d'une politique de maintenance préventive conditionnelle...	8
Figure 4-4 : Fabrication du ciment portelant.....	88
Figure 4-5 : Les différents étapes de diagnostic d'une machine tournante.....	90
Figure 4-6 : Cinématique du réducteur planétaire.....	91
Figure 4-7 : Collecteur de données.....	93
Figure 4-8 : Comparaison des niveau de tendance.....	94
Figure 4-9 : Schéma synoptique et points de mesures.....	95
Figure 4-10 : La tendance du point 3.1.....	96
Figure 4-11 : Spectre du point 3.1 (échelle logarithmique) .....	97
Figure 4-12 : représentation des harmoniques du point 3.1 (échelle logarithmique) .....	97
Figure 4-13: représentation des harmoniques du point 3.1 (échelle linéaire) .....	98
Figure 4-14 : La tendance du point 7.3.....	98
Figure 4-15 : La tendance du point 5.3.....	99
Figure 4-16 : La tendance du point 2.2.....	99
Figure 4-17 : La tendance du point 4.3.....	100
Figure 4-18 : La tendance du point 6.3.....	100

## ANNEXE

Tab1 : Paramètre de détection de défauts.

Paramètres Défauts	d'huile	Analyse	Acoustique	Température	Thermographie	Pression	Débit	Vibration	Temporel	Stroboscope	Alignement
Balourd								1			ü
Désalignement				ü	ü			1		ü	ü
Roulement à billes		ü	ü	ü	ü			1	ü		
Paliers		ü	ü	ü	ü	ü	ü	ü	ü		1
Engrenages		ü	ü					1			
Résonance			ü					1		ü	ü
Cavitation			ü					ü			
Courbure d'arbre								1			ü
Déséquilibre électrique								1			
Tourbillon d'huile								1			1
Courroie								ü		1	
Souillure								1		ü	ü
Contamination	1										
Manque de lubrifiant		ü	ü	1				ü	ü		ü

**Tableau 2** : Interprétation de l'évolution des indicateurs de suivi en mode global

déplacement	Vitesse	accélération	chocs	Exemples de défauts
↗	↗	→	→	Instabilité de palier ou frottement (palier fluide)
↗	↗	→	→	Balourd Désalignement
↗	↗	↗	↗	Usure d'accouplement Desserrage Jeux de paliers
→	→	↗	↗	Engrènement défectueux Passage de pales ou d'aubes ...
				Roulements
→	→	↗	→	Usure régulière
→	→	↗	→	Mauvais graissage
→	↗	↗	↗	Début d'écaillage
→	→	↗	↗	Marquage important
→	→	↗	↘	Dégradation importante

**Tableau 3 : Différents défauts et leurs identifications**

<b>Défauts</b>	<b>Signature fréquentielle</b>	<b>Remarque</b>
Déséquilibre (balourd)	1 $\omega$	amplitude proportionnelle au carré de la vitesse de rotation déphasage de 90° sur 2 mesures orthogonales
Déclignage	2 $\omega$ (parfois 3)	direction axiale importante si le déclignage comporte un écart angulaire
Déformation des arbres	1 $\omega$ (parfois 2 ou 3)	direction axiale
Défaut de palier	Très élevée (plusieurs $\omega$ )	
Défaut de roulement	Très élevée (plusieurs $\omega$ )	direction radiale et axiale
Défaut sur engrenage	Très élevée	dépend du nombre de dents
Mauvais serrage Défaut de fixation	1, 2,3 et 4 fois $\omega$	direction radiale
Jeu	$\frac{1}{2}$ , 1, $1\frac{1}{2}$ , 2, $2\frac{1}{2}$ ou 3 fois $\omega$	
Courroie défectueuse	1, 2,3 et 4 fois $\omega$	direction radiale importante
Défaut électrique	1 $\omega$ ou $\frac{1}{2}$ fréquences de synchronisation	direction axiale et radiale
Forces aérodynamiques	1 $\omega$ ou nombre de pales fois $\omega$	
Forces hydrauliques	1 $\omega$ ou nombre de pales fois $\omega$	
Tournoiement d'huile	Inférieure à $\omega$ de 0.42 à 0.48	uniquement sur paliers lisses hydrodynamiques à grande vitesse
Défaut d'étanchéité	Inférieure à $\omega$	

**Tableau 4 : Défauts d'alignements et leurs identifications**

Signature	Défaut
Composante d'ordre 2,3 ou 4supérieures aux composantes d'ordre 1	Ensemble des défauts d'alignement
Composante d'ordre 2,3 ou 4supérieures aux composantes d'ordre 1 dans la direction axiale	Déclivage angulaire ou déformation
Composante d'ordre 2,3 ou 4supérieures aux composantes d'ordre 1 dans la direction radiale	Défaut de concentricité

**Tableau 5 : Niveaux vibratoires admissibles sur les machines tournantes AFNOR E 90 300(ISO 2372)**

Niveaux vibratoires admissibles (mm/s en RMS)	Groupe 1		Groupe 2		Groupe 3		Groupe 4		
Amplitude efficace de la vitesse vibratoire (mm/s) [10 ; 1000] Hz	28 -		Mauvais		Mauvais		Mauvais		Mauvais
	18 -		Mauvais		Mauvais		Mauvais	18.0	Limite
	11.2 -		Mauvais		Mauvais	11.2	Limite		Limite
	7.1 -		Mauvais	7.1	Limite		Limite	7.1	Moyen
	4.5 -	4.5	Limite		Limite	4.5	Moyen		Moyen
	2.8 -		Limite	2.8	Moyen		Moyen	2.8	Bon
	1.8 -	1.8	Moyen		Moyen	1.8	Bon		Bon
	1.12 -		Moyen	1.12	Bon		Bon		Bon
	0.71 -	0.71	Bon		Bon		Bon		Bon
0.45 -		Bon		Bon		Bon		Bon	

### **Classement des machines par groupe de puissance**

**Groupe 1 :** Eléments de moteurs ou de machines qui, dans ses conditions normales de fonctionnement, sont intimement solidaires de l'ensemble d'une machine. (Les moteurs électriques produits en série, de puissance allant jusqu'à 15 kW, sont des exemples typiques de machines de ce groupe)

**Groupe 2 :** Machines de taille moyenne, (en particulier les moteurs électriques de puissance comprise entre 15 et 75 kW) sans fondations spéciales. Moteurs montés de façon rigide ou machines (puissances jusqu'à 300 kW) sur fondations spéciales.

**Groupe 3 :** Moteurs de grandes dimensions et autres grosses machines ayant leurs masses tournantes montées sur des fondations rigides et lourdes, relativement rigides dans le sens de la vibration.

**Groupe 4 :** Moteurs de grandes dimensions et autres grosses machines ayant leurs masses tournantes montées sur des fondations relativement souples dans le sens de la vibration (exemple : groupe turbo-générateurs, particulièrement ceux qui sont installés sur des fondations légères).