

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE MENTOURI DE CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

N° d'ordre : 235 / Mag / 2008
Série : 007 / GM / 2008

MEMOIRE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de magister
En génie mécanique

OPTION

Mécanique Appliquée en Engineering

THEME

**CONTRIBUTION A L'OPTIMISATION DE LA MAINTENANCE PREDICTIVE
PAR L'UTILISATION DU LOGICIEL OMNITREND (SYSTEME ON LINE)
CAS : CIMENTERIE HAMMA BOUZIANE**

Par
BELHOUR SAMIRA

Devant le jury :

Président	S. Benissaad	M.C. Univ. Constantine
Rapporteur	T. Benmanssour	M.C. Univ. Constantine
Examineur	K. Talbi	M.C. Univ. Constantine
Examineur	T. Zarza	M.C. Univ. Constantine

Soutenu le : 01/07/2008

*À tous les êtres chers
dont le soutien m'a été indispensable.
Nadia et Salima*

Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier monsieur **Nasseredine Boulkroune**, le sous directeur de la maintenance à **SCHB**, pour avoir eu l'idée initiatrice de ce projet. Je tiens aussi à remercier chaleureusement monsieur **Farahat Masfar**, pour m'avoir initié et aidé avec compétence et bienveillance. Je lui témoigne ma profonde reconnaissance.

Une partie de ce travail a été effectué dans le BEM de la SME chargé de la maintenance des équipements, sous la direction de monsieur **Ahmed Tomache**. Je tiens à le remercier pour m'avoir bien accueilli, et permis ainsi, d'évoluer dans un cadre scientifique idéal et profiter d'excellentes conditions de travail ; les nombreux commentaires et résultats, inspirés de problèmes industriels concrets, ont aidé et orienté cette étude. Un grand remerciement s'adresse également à Monsieur **Amar Ouldji** ingénieur dans la SME, toujours disponible et impliqué. Je le remercie pour les longues discussions, et pour m'avoir conseillé et orienté mes travaux au niveau de l'expérimentation. Je lui suis vivement reconnaissante. L'expérience industrielle acquise au cours de ma maîtrise a une valeur inestimable à mes yeux.

De plus, je remercie tous les employés de la SME, SCHB de m'avoir accueilli comme un des leurs le long de mon travail. Dans le milieu universitaire, Je tiens tout d'abords à remercier Monsieur **Ismail Benissaad**, le directeur du département de génie mécanique de l'université Mentouri Constantine, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse. Je voudrais également adresser mes plus vifs remerciements à messieurs **Kamel Talbi** et **Tahar zarza** pour m'avoir fait l'honneur de participer à l'évaluation de ce travail, qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance.

Je voudrais adresser ma plus sincère gratitude à mon directeur de thèse Monsieur **Toufik Benmansour**, sans qui ce travail n'aurait pas pu voir le jour, pour m'avoir fait confiance et avoir cru en mes capacités, Mais surtout, je tiens à le remercier pour sa disponibilité malgré ses multiples occupations.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Monsieur **Chaib Rachid** pour ses aides scientifiques et humaines ainsi que pour son soutien moral.

Je ne saurais jamais remercier assez **Nadia** pour son amour, son encouragement indéfectible et son soutien inconditionnel qu'elle m'a apporté pendant mes deux années d'étude (et celles qui ont précédé) tout particulièrement dans les moments difficiles. Je lui dédie ce travail.

ملخص:

أصبحت الصيانة في عصرنا مصدرا للمعلومات المتعلقة بالإنتاج، بالجودة و الأمن. لكنها تجمع في الوقت نفسه بين المشكلة الاقتصادية و الجودة الإنتاجية. من هذا المنطلق توجب البحث عن استراتيجيات ملائمة للصيانة والتي تحقق التوازن بين الصيانة التصحيحية و الصيانة الوقائية. بات من المسلم به أن الصيانة الوقائية الشرطية هي الحل، فمنذ إدراجها في الصيانة، أثبتت قيمتها بزيادة الإنتاج وارتفاع الجودة، و التقليل من الوقت الضائع من توقف الإنتاج الاضطراري في اغلب الأحيان، من هذا المنطلق ولتحقيق أكبر الفوائد تم اعتماد نظام "ON-LINE" من طرف مؤسسة صناعة الإسمنت منذ سنة 1995 وتعتبر السبابة في هذا المجال بين مصانع الإسمنت حيث يسهر هذا النظام على المتابعة المستمرة لوسائل الإنتاج عن طريق برنامج خاص "OMNITREND" ويهدف إلى تحقيق أقصى الفوائد.

في الواقع هناك عدة وسائل لتحقيق الصيانة الوقائية الشرطية من أهمها دراسة الإهتزازات الناجمة عن الماكينات الدوارة، حيث أثبتت التجارب بأنها الوسيلة الأنجع في تشخيص حالة الماكينات الدوارة و تحديد العيوب في أوقات مبكرة من ظهورها وكذا موقعها بالضبط قبل أن تؤدي إلى العواقب الوخيمة. ومن هذا المنطلق قمنا بدراسة معمقة على أرض الواقع في كل من مصنع الإسمنت بالحامة بوزيان SCHB و مؤسسة تصليح العتاد بالشرق SME اعتمدنا فيها على تشخيص عيوب الماكينات باستعمال مؤشر الإهتزازات، و بتحليل معمق للصورة الإهتزازية تم تحديد موقع العطب بدقة تامة.

الكلمات المفتاح:

الصيانة الشرطية، تحليل الاهتزازات، اهتزازات الماكينات الدوارة، تشخيص الصور الإهتزازية

Résumé

La maintenance est devenue un gisement d'enseignement sur la productivité, la qualité et la sécurité, cependant elle pose à la fois un problème d'économie et de performance. De ce fait la meilleure stratégie de maintenance est celle qui assure un équilibre entre la maintenance corrective et la maintenance préventive.

La maintenance conditionnelle est la solution, incorporée dans les systèmes de gestion, elle a fait ses preuves ; réduire les temps d'immobilisation, optimiser la fabrication, les ressources et la rentabilité de la production. Cependant une optimisation de la maintenance est réalisée par un suivi continu de la dégradation, par le biais d'un système de contrôle en ligne "On-line" qui peut répondre aux impératifs industriels et qui permet de définir le juste nécessaire au niveau des interventions, "La machine n'est révisée que si son état le nécessite".

Pour que la maintenance conditionnelle soit efficace, il faut des mesures précises et fiables. Toutefois, l'expérience a montré que la mesure vibratoire est le paramètre le plus fiable qui donne le plus précocement et de la meilleure façon l'état de détérioration d'une machine tournante. Elle permet d'identifier les efforts dès qu'ils apparaissent, avant qu'ils n'aient causé des dommages irréversibles, elle permettra aussi après analyse d'en déduire l'origine et d'estimer les risques de défaillance.

Dans ce contexte j'ai fait une étude à la cimenterie de Hamma Bouziane, qui a adopté une surveillance continue (On-line) depuis 2005, dans l'espoir d'une démarche optimale de la maintenance conditionnelle pouvant se développer dans le temps vers une maintenance idéalisée du type prévisionnelle. J'ai eu aussi le privilège de continuer mon travail au sein de la SME chargée de la maintenance des équipements pour les cimenteries de l'est, des mesures réelles ont été analysées par l'indicateur vibratoire en aboutissant à des résultats satisfaisants.

Mots clés :

Maintenance conditionnelle, management de maintenance, analyse vibratoire, analyse spectrale, vibration des rotors.

Abstract

Maintenance became a layer of instruction on the productivity, quality and safety; however it poses at the same time a problem of economy and performance. From this fact the best strategy of maintenance is that which ensures a balance between corrective maintenance and the preventive maintenance. Conditional maintenance is the solution, built-in in the systems of management, it proved reliable; to reduce the downtimes, to optimize manufacture, the resources and the profitability of the production.

However an optimization of maintenance is carried out by a continuous follow-up of degradation, spoke oblique about a system of control in line ' ' ON-LINE' ' which can answer the industrial requirements and which makes it possible to define the Just necessary to the level of the interventions, ' ' the machine is revised only if its state the necessity".

In order that conditional maintenance to be effective, precise and reliable measurements are strongly recommended. However, the experiment showed that vibratory measurement is the most reliable parameter which gives most precociously and in the best way the state of deterioration of a monitoring machine. Its makes it possible to identify the efforts as soon as they appear, before it did not cause irreversible damage, it also makes it possible after analysis from it to deduce the origin and to estimate the risks of failure. Within this context I made a study in the cement factory of Hamma Bouziane, which adopted a monitoring continues (ON-INE) since 2005, in the hope of an optimal step of conditional maintenance which can develop in time towards a idealized maintenance of the type estimated.

I had also the privilege to continue my work within the SME in charge of the maintenance of the equipment for the cement factories of the east, real measurement have been collected then analyzed by the vibratory indicator and have conducted satisfactory results.

Key words:

Conditional maintenance, management of maintenance, analyze vibratory, analyze spectral, vibration of the rotors.

Table des matières

Nomenclature	xi
Liste des tableaux	xii
Liste des figures	xii
Introduction générale	1
Chapitre I : L’impact de la maintenance	8
I.1.Introduction	8
I.2.La maintenance	9
I.3. les méthodes de management de maintenance	10
I.3.1. Maintenance corrective.	12
I.3.1.1. Définition	12
I.3.2. Maintenance préventive	13
I.3.2.1. La maintenance préventive systématique	14
I.4. Enjeux de la maintenance	16
I.5.Conclusion	18
Chapitre II : La maintenance préventive conditionnelle	19
II.1. Définition	19
II.2. Maintenance prédictive (prévisionnelle)	19
II.3. Illustration du principe de la maintenance conditionnelle	20
II.4. Outils de la maintenance préventive conditionnelle.	22
II.4.1. L’analyse vibratoire	22
II.4.2. l’analyse des lubrifiants	23
II.4.3. Thermographie	24
II.5. Le Choix de l’outil de surveillance	25
II.5.1. Elément de comparaisons entre les différentes méthodes de l’entretien préventif.	25
II.5.2. les Principales méthodes de détection suivant les défauts potentiels	26
II.6. les objectifs visés par la maintenance conditionnelle	26
II.6.1. Améliorer la fiabilité du matériel	26
II.6.2. Garantir la qualité des produits	27
II.6.3. Améliorer l’ordonnancement des travaux	27
II.6.4. Assurer la sécurité humaine et la sûreté de fonctionnement	27
II.6.5. Améliorer la gestion des stocks	27
II.6.6. Améliorer le climat de relation humaine	27

II.6.7. Réduction du coup global de maintenance	28
II.7. Eléments de comparaison	28
II.7.1. Maintenance corrective	28
II.7.2. Maintenance préventive systématique	29
II.7.3. Maintenance préventive conditionnelle et maintenance prévisionnelle	29
II.8. Choix d'une politique de maintenance	30
II.9. la mise en œuvre d'une maintenance conditionnelle	33
II.10. Optimisation de la maintenance conditionnelle prévisionnelle	35
II.10.1. Changement de Culture	36
II.10.2. Utilisation appropriée des technologies prévisionnelles.....	36
II.10.3. Sélection des machines à surveiller.	37
II.11. Constatations et recommandations	38
II.12. Conclusion	41
Chapitre III : la surveillance des équipements	42
III.1. Introduction	42
III.2. La surveillance On-line	43
III.3. La surveillance off-line	44
III.5. Investissement mise en œuvre des deux types de surveillance.	46
III.6. Système de surveillance SCV On-line	47
III.6.1. Introduction	47
III.6.2. Description du système de surveillance.....	47
III.6.3. Capteurs et accessoires du système SCV (OMNITREND).....	49
III.6.3.1. Mesure de vibration :	49
III.6.3.2. Mesure de température de surface	50
III.6.3.3. Mesure de vitesse et référence de phase.....	50
III.6.3.4. Boîtes de jonction	50
III.7. Fréquence de mesure et d'enregistrement des valeurs globales, et des spectres.....	51
III.8. Configuration de la base de données d'après l'intervention du fournisseur.....	51
III.9. Point de mesure	52
III.10. Topographie du site	54
III.11. Propositions pour optimiser la surveillance On-line.	56
III.12. Exemples de mise en évidence de l'apport de la surveillance continue.....	58
III.13. Conclusion	59

Chapitre IV : Etat de l'art des analyses vibratoires sur machines tournantes.....	60
IV.1.Introduction	60
IV.2. Notions fondamentales	61
IV.2.1. Définition d'une vibration	62
IV.2.2. Amplitudes	65
IV.2.3. Nature d'une vibration	66
IV.3. Choix des grandeurs physiques à mesurer	67
IV.3.1. Domaine de surveillance	67
IV.4. Indicateurs vibratoires	69
IV.4.1. Définition	69
IV.4.2. Les indicateurs scalaires	70
IV.4.3. Les indicateurs spectraux	72
IV.4.4. Incidences du choix d'un indicateur :	72
IV.4.5. Défauts potentiels des rotors et leurs indicateurs	73
V.4.6. Seuil d'un indicateur	73
IV.4.6.1. Méthode du relevé global	74
IV.4.6.2. Méthode de l'analyse spectrale	75
Chapitre V : le Suivi et le Diagnostic appliqué à des cas réels.	85
V.1. Cas du suivi On-line du broyeur clinker M15-16H002	85
V.2. Le Suivi Off Line du diagnostic vibratoire du ventilateur R1S07.....	88
V.2. 1. Introduction	88
V.2. Matériel pour diagnostic :	89
V.3. Application à l'Etude du Ventilateur	90
V.3.1. Etude cinématique	91
V.3.1.1. La chaîne cinématique	91
V.3.1.2. Elément cinématique	91
V.3.1.3. Calcul des données techniques principales :.....	92
V.4. La configuration des points de mesure	93
V.5. La méthodologie de diagnostic:	94
V.5.1. Niveau global accélération :	94
V.5.2. Niveau global vitesse :	95
V.5.3. Le Facteur de Défaut de Roulement DEF.....	95
V.5.4. Indicateur d'après la fréquence d'engrènement F_e , avec ses harmoniques.....	95

V.5.5. l'analyse par Cepstre et Enveloppe	96
V.6. Investigation de la machine R1S07	96
V.6.1. Analyse du point 3RH	97
V.6.1.1. Analyse en niveau global	97
V.6.1.2. l'analyse spectrale des mesures effectuées au point 3RH	99
V.6.1.2.1. Analyse de l'amplitude de la fréquence d'engrènement et ses harmoniques	100
V.6.1.2.2. Analyse par bandes latérales	104
V.6.1.2.3. Analyse par cepstre	107
V.6.1.3. Défaut roulement réducteur : palier 3	108
V.6.2. Analyse du point 8RH (palier mobile)	112
V.6.2.1. Analyse du facteur défaut roulement	112
V.6.2.2. Analyse par bandes latérales.	115
V.6.2.3. Détection de défaut par analyse cepstrale.....	117
V.6.2.4. Détection de défaut par spectre d'enveloppe.....	117
V.7. conclusion	119
Conclusion générale	120
Références bibliographiques	122
Annexe 1	125
Annexe 2	126
Annexe 3	127
Annexe4	128
Annexe5	129

Nomenclature

I_{ps} : intervention préventive systématique

I_c = intervention Corrective

MTBF : Moyenne des temps de bon fonctionnement.

AMDEC : Analyse des modes de défaillances et de leurs criticités

$\lambda(t)$: le taux de défaillance.

CPM : cycle par minute.

RPM : rotation par minute.

(V_c) : amplitude crête.

(V_{cc}) (peak to peak en anglais) ou l'amplitude crête à crête.

$DEF = a \times F_C + b \times V_{Eff}$: facteur défaut de roulement :

$$F_C = \frac{v_c}{v_{Eff}} : \text{facteur crête}$$

v_{Eff} = valeur efficace

F_r : la fréquence de rotation de l'arbre.

F_e = fréquence d'engrènement

F_{ER} = défaut élément roulant

F_{ext} = défaut bague extérieure

F_{int} = défaut élément intérieure

F_{cage} = défaut cage

d : le diamètre d'une bille,

D_m : le diamètre moyen du roulement.

A : l'angle de contact.

N : le nombre de billes.

Liste des tableaux

- Tableau. II.1 : Choix de l'outil de surveillance.
 Tableau. II.2 : Classement des défauts suivant les méthodes de détection.
 Tableau. III.1: la topographie du site.
 Tableau III.2 : évolution de HATM/ HT
 Tableau. IV.1: L'indicateur de surveillance et l'amplitude correspondante.
 Tableau. IV.2: Suivi du niveau vibratoire des indicateurs.
 Tableau. IV.3: Les défauts potentiels des rotors et leurs indicateurs.
 Tableau. V.1: Localisation des défauts dans les transmissions de puissance à engrenages.
 Tableau. V.2: Fiche technique des équipements.
 Tableau. V.3: les fréquences du ventilateur R1S07.
 Tableau. V.4: les fréquences des défauts des roulements du ventilateur R1S07.
 Tableau. V.5: Les mesures des NG (accélération, vitesse, DEF).

Liste des figures

- Fig. I.1 : Illustration du principe de maintenance conditionnelle.
 Fig. I.2 : Les stratégies de maintenance.
 Fig. I.3 : Taux de défaillance en fonction du temps.
 Fig. I.4 : Illustration du principe de la maintenance systématique.
 Fig. I.5 : Dosage optimal de MP et MC.
 Fig. II.1 : Principe de la maintenance conditionnelle.
 Fig. II.2 : Choix optimal du temps d'intervention de la maintenance et son impact sur la production.
 Fig. II.3 : Enoncé de la fonction globale d'une politique de maintenance préventive conditionnelle.
 Fig. II.4: Détermination de la durée de vie optimale.
 Fig. II.5: Choix d'une politique de maintenance.
 Fig. II.6: Le chemin logique de la mise en œuvre.
 Fig. II.7: Iceberg des coûts.
 Fig. III.1: Les méthodes du suivi des machines.
 Fig. III.2: la surveillance On-line.
 Fig. III.3: la surveillance off-line.
 Fig. III.4: investissement et mise en œuvre des deux types de suivi.
 Fig. III.5: choix de la périodicité du suivi.
 Fig. III.6: La topographie du site.
 Fig. III.7: La représentation de la structure hiérarchique de la base de données.
 Fig. III.8: Visualisation des 15 machines sous surveillance ON-LINE.
 Fig. III.9: représentation des points de mesure des vibrations.
 Fig. III.10: La topographie du site.
 Fig. IV.1: Principe de la surveillance vibratoire.
 Fig. IV.2: Mesure d'une vibration.
 Fig. IV.3: Représentation des types de vibration.
 Fig. IV.4: Représentation du mouvement d'un système simple.
 Fig. IV.5: Les amplitudes d'un signal vibratoire quelconque.
 Fig. IV.6: Nature de la vibration selon les variations de son amplitude en fonction du temps.
 Fig. IV.7: Choix des grandeurs physiques à mesurer en fonction de la nature des défauts recherchés.
 Fig. IV.8: Niveau Global Vitesse [2-1 000] Hz.
 Fig. IV.9: Spectre [2-1 000] Hz.
 Fig. IV.10: La détermination des seuils par la méthode du relevé global.

- Fig. IV.11: L'utilisation des NG pour le suivi des défauts très énergétiques.
- Fig. IV.12: Détermination des seuils en analyse spectrale. [27].
- Fig. IV.13: L'utilisation de la mesure du spectre le suivi des défauts de faible amplitude.
- Fig. IV.14: Surveillance d'une bande de fréquences.
- Fig. IV.15: Signal temporel de mesure d'accélération au palier en présence de défauts multiples.
- Fig. IV.16: Spectre caractéristique des signaux de vitesse aux paliers en présence de défauts multiples
- Fig. IV.17: Cepstre de signal d'accélération à un palier avec défaut de roulement.
- Fig. IV.18: Représentation de défaut sur la bague extérieure d'un roulement [SKF].
- Fig.V.1: NGvit avant intervention.
- Fig.V.2: Spectre avant intervention.
- Fig.V.3: Spectre après intervention.
- Fig.V.4: Evolution du NGvit avant et après intervention.
- Fig.V.5: Spectres en cascade pour la mise en contraste des atténuations résultant de l'intervention.
- Fig.V.6: Réducteur: vue sur site.
- Fig.V.7: Chaîne cinématique.
- Fig. V.8: Le synoptique du ventilateur R1S07.
- Fig.V.9: La tendance du point 3RH en NG Accélération.
- Fig. V.10: La tendance du point 3RH en Vitesse.
- Fig.V.11: La tendance du point 3RH en DEF.
- Fig.V.12: La tendance du point 3RH en Fe, 2Fe, 3Fe.
- Fig.V.13: Spectre concaténé en échelle logarithmique.
- Fig.V.14: Spectre concaténé en échelle logarithmique après un zoom.
- Fig.V.15: Spectre concaténé en échelle linéaire.
- Fig.V.16: la mise en évidence des harmoniques de la fréquence d'engrènement.
- Fig.V.17: la mise en évidence d'un phénomène de modulation autour de la fréquence d'engrènement et la troisième harmonique (échelle logarithmique).
- Fig.V.18: la mise en évidence d'un phénomène de modulation autour de la fréquence d'engrènement et la troisième harmonique (échelle linéaire).
- Fig.V.19: évolution des amplitudes des bandes latérales (échelle logarithmique).
- Fig.V.20: évolution des amplitudes des bandes latérales (échelle linéaire).
- Fig.V.21: le cepstre du point 3RH (a, b)
- Fig.V.22: Spectre concaténé avec Zoom autour de la fréquence du défaut de la bague extérieure échelle logarithmique
- Fig.V.23: Spectre concaténé avec Zoom autour de la fréquence du défaut de la bague extérieure échelle linéaire.
- Fig. V.24: Une photo réelle pignon après le démontage.
- Fig.V.25: Une photo réelle du roulement du réducteur après le démontage.
- Fig.V.26: comparaison des deux spectres avant et après changement du réducteur (échelle logarithmique (a, b)).
- Fig.V.27: Comparaison des deux spectres avant et après changement du réducteur (échelle linéaire).
- Fig. V.28: Spectres avant et après graissage du point 8RH (a, b).
- Fig. V.29: Spectres superposés avant et après graissage 8RH.
- Fig. V.30: Spectre du point 8RH montrant la résonance.
- Fig. V.31: Spectre du point 8RH mettant en évidence des bandes latérales (a, b).
- Fig. V.32: cepstre du point 8 RH.
- Fig.V33: spectre d'enveloppe du point 8 RH.

Introduction générale

Introduction générale

La vie des entreprises des pays industrialisés ou en voie de l'être est caractérisée par des mutations profondes : technologiques, économiques et sociales.

Il en est ainsi pour notre pays avec l'édification d'une base industrielle importante souvent avec l'apport initial des technologies occidentales, et avec la mondialisation des marchés qui a accru le besoin de maintenance et d'optimisation du niveau de performance des outils de production.

Le patrimoine industriel rencontre des difficultés pour assurer une maintenance appropriée qui répond à un besoin nouveau : celui de maîtriser techniquement et économiquement des systèmes productifs automatisés dans un environnement fortement informatisé, tout en évitant de mettre en péril la sécurité des personnes, contribuant ainsi à la pérennité.

Or, comme les pannes et les incidents des systèmes de production sont l'un des fléaux majeurs de l'industrie et viennent amputer lourdement la capacité de production, voire accroître le prix de revient. Le problème d'accessibilité des éléments de machines peut être une cause dans la longueur de réparation de certaines pannes, le démontage est difficile et coûteux en temps et moyens. De plus, l'impact que peut laisser une fonction cachée dont la défaillance n'est pas évidente à l'équipage, durant les cours des rondes normales des opérateurs. Il faut signaler aussi qu'un manque de pièce de rechange à un moment critique peut induire des frais directs et indirects importants, sinon une immobilisation des sommes importantes dans le stock de pièces de rechanges, la panne entraîne donc une perte de production, avec son inévitable coût, un glissement dans les délais de livraison qui rejaille sur la crédibilité et l'image de la société sans compter les erreurs humaines inévitables, lors des arrêts et des remises en service.

Pour répondre à ces impératifs industriels est allé au delà des gains résultants des politiques de maintenance préventives systématiques, voire des conditions optimales de maintenance des équipements fondées sur la connaissance de la fiabilité, nous faisons appel à un système de management de la maintenance utilisant le logiciel « OMITREND ». Hormis, la maintenance qui est une fonction «masquée» agissant comme prestataire de service interne et, de plus, fortement évolutive devient une fonction de management à part entière intégrant la qualité de sécurité, le respect de délais, la gestion globale et la maîtrise des équipements.

Cependant, cette amélioration de la disponibilité des machines, impérative aujourd'hui, ne doit pas entraîner une inflation du budget de maintenance déjà bien lourd dans beaucoup d'industries, sous peine d'en amoindrir l'intérêt.

Les entreprises sont donc confrontées à ce double défi économique :

- ◆ augmenter la productivité par une disponibilité accrue de leur outil de production
- ◆ diminuer les coûts d'entretien et de réparation.

De ce fait, le but de ce travail est d'optimiser la politique de maintenance par le développement raisonné de la maintenance préventive, en garantissant une surveillance du parc machines, et en assurant au système de production, l'augmentation de sa disponibilité instantanée, de sa disponibilité moyenne, de sa maintenabilité, de sa sécurité opérationnelle et de sa qualité, tout en diminuant au maximum les dépenses liées aux achats et opérations d'entretien. Ces besoins justifient la mise en place d'un système efficace de gestion de maintenance, dont l'objectif est d'anticiper la défaillance, par un suivi continu de la dégradation en utilisant le logiciel OMNITREND qui permet de visualiser en temps réel l'état du parc de machines, et voir, 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. Ce qui nous permettra d'utiliser rationnellement les composants jusqu'à l'usure complète sans aucun risque, et ainsi éviter toute casse soudaine et pratiquer ainsi la maintenance sélective.

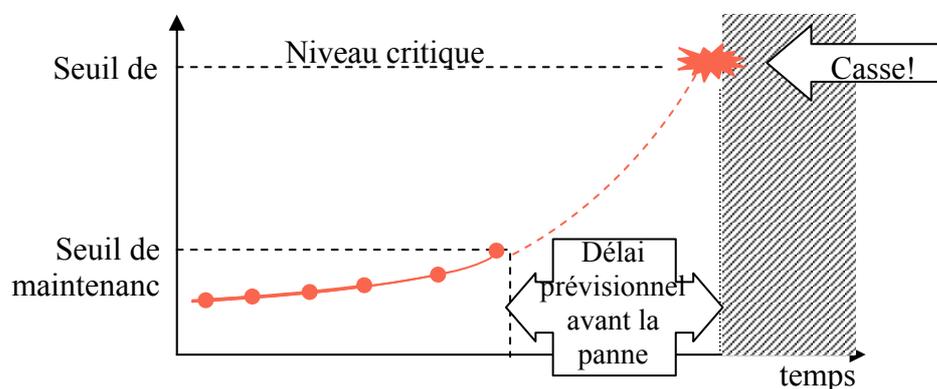


Fig.I.1 : Illustration du principe de maintenance conditionnelle.

Ces dernières années, la surveillance et le diagnostic des machines tournantes par l'analyse des vibrations sont devenu un outil efficace pour détecter à un stade précoce les défauts et en

suivre l'évolution dans le temps, ce qui permettra de projeter une action d'entretien prédictive. Beaucoup de chercheurs ont travaillé sur la maintenance et les vibrations.

Eugène Désiré EFAGA propose une stratégie générale d'organisation et de gestion de la maintenance basée sur le retour d'expérience (**SOGMBREX**), qui consiste à représenter une structure qui intègre la dualité de l'étude sur l'aspect organisation et technico-économique afin d'accentuer les notions de flexibilité, relativité, et de complémentarité qui aideront les responsables à prendre les bonnes décisions [1]. Dans le contexte de la gestion et l'organisation propre de la maintenance, une approche simplifiée de la méthode AMDEC (Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité) pour les défaillances fonctionnelles est utilisée pour chaque moyen de production [1].

Les arrêts de production dus à des défauts de l'équipement sont coûteux dans les centrales hydroélectriques. Ces arrêts peuvent être causés par un mauvais asservissement de la vitesse des générateurs. **CHARLES CYR** utilise un système de monitoring des performances de régulation qui permet de connaître à intervalle rapproché l'état de l'asservissement de vitesse des générateurs. Ces méthodes de détection de défauts développées et appliquées aux générateurs déterminent la probabilité d'occurrence d'un arrêt de production engendré par une instabilité [2].

B. Jung, E. Levrat propose une approche qui emploie l'algorithme "de "odds basée sur la théorie d'arrêt optimal. Dont l'objectif est de choisir, parmi tous les arrêts de production déjà prévus, ceux qui seront optimaux pour développer des tâches d'entretien gardant les conditions prévues de produit. Il combine des critères tels que la fiabilité fonctionnelle d'exécution et de composant, en tenant compte des résultats d'un processus de pronostic [3].

Les engrenages et les roulements constituent les éléments les plus importants dans les machines tournantes et font l'objet de beaucoup de recherches.

Ales Belsak et Joze Flaker présentent un modèle typique de spectrogramme d'une analyse de court-temps-fréquence liée à la présence d'une fissure dans une racine de dent. Ils sont arrivés à montrer que ce modèle est beaucoup plus fiable que l'analyse de fréquence classique. La fiabilité de détection de défaut est aussi haute (75%), d'autre part la définition d'un modèle spectrogramme de temps-fréquence, dans un spectre tridimensionnel est considérablement plus rapide [4].

Dans sa thèse **D.Claire Breneur** a étudié le cas des défauts combinés à partir d'expérimentations menées sur un modèle de réducteur simple étage, en considérant soit séparément, soit simultanément, des défauts d'engrenages et de roulements. A partir de

l'analyse des signaux il a pu sélectionner les moyens de mesures et de traitement nécessaire à la définition d'indicateurs d'avaries valables dans les cas d'anomalies combinées ou non, il a montré que le spectre et le cepstre de l'enveloppe des signaux d'accélération sont des indicateurs performants [5]. Dans ce même axe **Hadjer SAADI** a étudié les signaux vibratoires produits par un système de transmission par engrenages. Son étude s'est consacrée aux modifications des signaux apportés par la présence de défauts de fatigue d'engrenages, à travers des mesures issues de différents bancs d'essais et pour différentes conditions [6].

Sadettin Orhan, Nizami Akturk ont réalisé des études de cas d'analyse dans les machineries qui fonctionnaient en vraies conditions de fonctionnement. Des échecs formés sur les machineries au cours du temps, ont été déterminés à sa première partie par l'analyse spectrale. On a montré que l'analyse de vibration obtient beaucoup d'avantages dans les usines comme technique prédictive d'entretien. Ils ont fait un diagnostic réussi d'un défaut de bague externe d'un roulement à bille [7].

J.P. Dron, F. Bolaers ont montré par une étude l'intérêt de la soustraction spectrale pour l'amélioration de la sensibilité des indicateurs scalaires (facteur de crête, kurtosis) dans l'application de la maintenance conditionnelle par l'analyse vibratoire sur les roulements à billes. Le cas d'un roulement en bons états la distribution des amplitudes dans le signal est de sorte gaussienne. Quand le roulement est endommagé, une modification de cette distribution est produite causé par la présence des impulsions périodiques. Le bruit de fond peut avoir une influence sur les valeurs de ces indicateurs temporels [8].

Abdullah M. Al-Ghamda montrent l'importance de l'application de l'émission acoustique (AE) pour le diagnostic de roulement comme outil diagnostic complémentaire à la surveillance vibratoire, en faisant une recherche expérimentale portée sur l'application de la technique d'AE pour identifier la présence et la taille d'un défaut sur un roulement radialement chargé. En faisant des comparaisons entre AE et analyse de vibration sur une gamme des conditions de charge de vitesse, ils sont arrivés à conclure que la méthode AE offre une détection de défaut précoce et des possibilités améliorées d'identification que l'analyse de vibration. En outre, la technique d'AE fournit une indication de la taille de défaut, permettant à l'utilisateur de surveiller le taux de dégradation sur le roulement [9].

J. Antoni a prouvé que les vibrations produites par un roulement défectueux sont essentiellement cyclostationnaires aléatoires (au lieu de l'harmonique) dans la gamme à haute fréquence où le rapport signal/bruit est maximal, de ce fait l'analyse spectrale classique s'avère souvent un échec. Le spectre d'enveloppe ajusté s'avère être un cas spécial de la concordance

cyclique qui donne de bons résultats, à condition que il tire bénéfice d'information proportionnée à calculer correctement (c.-à-d. la connaissance de la bande de démodulation où le rapport signal/bruit est maximal) [10].

F. Bogard, K. Debray proposent une méthodologie numérique pour déterminer des positions optimales de sonde pour l'entretien prédictif. Pour cet objectif ils ont adopté une méthodologie numérique basée sur un modèle des éléments finis et une analyse spectrale. Un modèle analytique de roulement est adopté pour éviter des calculs compliqués, ils ont obtenu la matrice de rigidité de tangente de l'élément de roulement par la méthode de **Newton-Raphson**, cette matrice est employée pour l'analyse dynamique. L'analyse des vecteurs de réponse dans le domaine de fréquence laisse trouver les zones les plus sensibles aux excitations de défaut [11].

L'intérêt économique de mettre en place une méthode de maintenance prédictive favorise les programmes de recherche en techniques de traitement du signal, pour pouvoir détecter l'apparition des défauts précocement et en suivre l'évolution **MIR-SAEED SAFIZADEH** montre que les techniques de traitement du signal classiques (dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel) conduisent souvent à des pertes de temps considérables ou à la formulation de diagnostics erronés. La localisation de l'origine des chocs et des phénomènes de modulation et, en particulier, des événements non stationnaires ou cyclostationnaires nécessite la mise en oeuvre de techniques encore plus élaborées, basées sur l'analyse tridimensionnelle (temps-fréquence-amplitude. qui peuvent être utilisées pour étudier le contenu fréquentiel d'un processus non stationnaire [12].

Dans ce contexte, et dans le cadre de mon travail de thèse, une première partie de mon stage est effectuée au sein de la cimenterie de Hamma Bouziane : **SCHB**, implantée à l'Est du pays, plus précisément dans la commune de Hamma Bouziane à l'Est de Constantine, opérationnelle depuis 1982. On peut juger de l'importance économique de la cimenterie qui emploie actuellement une main d'œuvre directe de 450 personnes, dont 152 dans le service de maintenance. Et par le taux de production estimé à 3000 tonne/jours.

Au début de sa création la cimenterie c'est basée sur une stratégie de maintenance systématique et /ou corrective. Cependant, pour remédier aux insuffisances constatées par cette pratique, coûteuse, une nouvelle démarche imposée par le duel de la concurrence a poussé le besoin d'introduire une nouvelle stratégie basée sur la maintenance conditionnelle qui est adoptée et mise en application depuis 1997 jusqu'à ce jour.

Les outils de la maintenance conditionnelle exploités jusqu'alors sont de deux types :

- une surveillance périodique (OFF-LINE) introduite depuis l'année 1997 utilisant l'outil Schenck. En plus le recours périodique à des sous-traitances avec la SME (société de maintenance des équipements)
- une surveillance continue (ON-LINE) est mise en place depuis 2005, dans l'espoir d'une démarche optimale de la maintenance conditionnelle pouvant se développer dans le temps vers une maintenance idéalisée du type prévisionnelle.

Pour la deuxième partie de mon stage, j'ai eu le privilège de continuer mon travail au sein de la SME chargée de la maintenance des équipements pour les cimenteries de l'est.

L'outil vibratoire constitue un indicateur déterminant pour l'expertise. Le logiciel Diva est exploité dans ce but.

De ce fait, notre travail est scindé en cinq chapitres :

Le premier chapitre présente une mise en valeur de la maintenance comme impérative nécessaire à une meilleure garantie de la disponibilité des équipements toujours en faveur d'un meilleur rendement de la production et de l'économie. Quelques définitions concernant la maintenance corrective et la maintenance systématique, tel que observées au sein de la cimenterie SCHB. Une discussion pour la mise en valeur des coûts imposés par l'entretien correctif confronté avec celui de l'entretien préventif. Ce qui abouti à une démarche d'optimisation de la maintenance, par combinaison stratégique des deux politiques d'entretiens.

Le deuxième chapitre est consacré à la maintenance conditionnelle, cette dernière est introduite d'un point de vue formel avec la définition préconisée par la norme AFNOR X 60-010. De même que pour La maintenance prévisionnelle qui constitue, le stade ultime de la maintenance. Quelques Illustrations du principe de la maintenance conditionnelle sont résumées sous forme de graphes récapitulatifs. Les moyens technologiques disponibles et en vigueur dans la pratique de la maintenance conditionnelle sont présentés. Notamment, l'analyse vibratoire, l'analyse des lubrifiants, la thermographie et l'analyse acoustique. Nous avons aussi développé une étude comparative entre les différentes stratégies de maintenance, en montrant clairement les objectifs visés par la maintenance conditionnelle. Un algorithme est présenté pour la mise en œuvre d'une maintenance prévisionnelle pour assurer sa pérennité. Enfin, guidé par le but d'optimiser la politique de maintenance nous avons terminé par des recommandations inspirées par des constations réelles durant mon stage.

Le troisième chapitre : Le troisième chapitre traite les différents types de surveillance des équipements : le On-line et le Off-line, chaque type de surveillance à ses inconvénients et ses avantages, reste à faire une combinaison entre ces deux types de surveillance pour atteindre les objectifs optimaux. La cimenterie de Hamma Bouziane a introduit un système expert pour le suivi On-line et Off-line du parc machine, d'ailleurs c'est la première cimenterie sur le territoire national, qui mit en place cette démarche. Le logiciel utilisé est l' OMNITREND, il est représenté en détail dans ce chapitre.

Malgré le coût d'investissement élevé de cette démarche, le coût de la mise en œuvre est faible par rapport au suivi On-line, nous avons donné quelques exemples réels, montrant l'importance de cette démarche.

Le quatrième chapitre : nous avons consacré ce chapitre à l'analyse vibratoire, qui constitue un outil puissant de détection des défauts. Après une définition de la vibration, de sa nature et de ses amplitudes, nous avons déterminé le choix des grandeurs physiques à mesurer suivant le domaine de surveillance, ainsi que les indicateurs caractérisant les vibrations ; indicateur scalaire et spectraux et l'incidence de leurs choix sur le diagnostic. Les principaux outils de diagnostic sont également présentés avec leurs principaux avantages et limitation. Notamment l'analyse temporelle, l'analyse spectrale, la démodulation d'amplitude, et l'analyse cepstrale. Enfin, un tableau récapitulatif des indicateurs simples dérivés du signal temporel, adopté pour la détection des défauts de roulements.

Le cinquième chapitre: dans le contexte de montrer l'intérêt des vibrations, comme le moyen le plus adapté à la détection en fonctionnement des dysfonctionnements des machines tournantes. Nous avons fait des études expérimentales à partir des cas réels;

- Un suivi de type On-line du broyeur cru BCII par le logiciel OMNITREND, qui traite un défaut de balourd.

- Un suivi du type Off-line du ventilateur R1S07 avec le logiciel DIVA, le choix de cette machine est basé sur l'objectif d'établir des éléments de diagnostic de défauts de roulement et d'engrenage à partir d'un cas réel. Pour ce but, nous avons développé la démarche mise en œuvre pour le suivi et le diagnostic, nous avons détaillé la structure des signaux vibratoires recueillis sur cette machine et les caractéristiques des effets des défauts sur ces mêmes signaux.

Chapitre I

L'impact de la maintenance

Chapitre I : L'impact de la maintenance

I.1.Introduction

Une entreprise qui veut être ou demeurer compétitive, doit produire toujours davantage et au coût le plus bas. Pour minimiser le coût, il existe plusieurs manières dont celle-ci : fabriquer plus vite et sans interruption des produits sans défauts afin d'atteindre la production maximale. Selon des études spécifiques à l'industrie, les coûts d'entretien peuvent représenter entre 15 et 60 % du coût de production, (pour moyenne et lourde industrie).

Les études récentes dans l'efficacité de gestion de la maintenance, indiquent que le un tiers de tous les coûts d'entretien est gaspillé pour un entretien inutile ou incorrectement effectué qui affecte de manière significative la capacité de fabriquer les produits de qualité et qui cause les pertes de temps de production. Quand vous considérez que l'industrie des États-Unis dépense plus de 200 milliards dollars tous les ans sur l'entretien de l'équipement, l'impact sur la productivité et le bénéfice représenté par l'opération d'entretien deviennent clairs [13].

Cela fait appel à des philosophies plus avancées de gestion de fabrication et de maintenance. La raison dominante de cette gestion inefficace est le manque de données effectives pour mesurer le besoin réel de réparation, ou l'entretien des machines, de l'équipement, et des systèmes. L'établissement du programme d'entretien a été, et est dans beaucoup de cas toujours, affirmé sur des données statistiques de tendance ou sur l'échec réel de l'équipement d'usine.

Jusqu'à récemment, la gestion a ignoré l'impact de l'opération d'entretien sur la qualité du produit, les coûts de production, et plus important, sur le bénéfice de ligne de fond. L'opinion générale a été: "la maintenance est un mal nécessaire" [13].

La maintenance n'est pas une destination ou bien une fin en soi, mais c'est une des fonctions de l'entreprise. Les décideurs sous-estiment son impact et la considère comme un centre de Coût, pourtant elle devient une composante de plus en plus sensible de la performance de l'entreprise. [1]

Comme toute activité industrielle, la maintenance évolue. Elle doit s'adapter aux contraintes de production et de service, elle bénéficie des développements technologiques et se doit d'être productive. La variété de matériels a fourni le moyen de réduire ou d'éliminer les réparations

inutiles, d'empêcher les pannes catastrophiques des machines, et de réduire l'impact négatif de l'opération de maintenance sur le rendement des entreprises et induit des politiques de maintenance variées et adaptées en fonction des besoins.

I.2.La maintenance

La maintenance est définie dans la norme NF EN 13306 comme étant : « l'ensemble de toutes les actions techniques administratives et de gestion, durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise »[14]

Cette définition appelle plusieurs remarques.

- Par « ensemble de toutes les actions », elle nous précise que la maintenance ne se limite pas aux seules interventions d'entretien, mais se doit d'englober aussi toutes les opérations de conduite et de surveillance pendant la marche. Par extension, les opérations de gestion des pièces de rechange, du personnel et des interventions font elles aussi partie de la maintenance.

- l'autre point primordial est donné par l'expression « état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ». Cela implique que, pour chaque machine ou groupe de machines dans un ensemble complexe, on ait clairement identifié les points suivants :

- l'objectif de la machine, prise individuellement ;
- l'appartenance de la machine à une chaîne ou un ensemble ;
- les interactions de la machine avec les portions de chaîne en amont et en aval ;
- les conséquences d'une non- conformité du premier point sur la chaîne amont et sur la chaîne aval.

L'identification de la mission globale de la machine servira de base à la mise au point d'un type de maintenance approprié.

Enfin, « maintenir » et « rétablir » sous-entendent d'avoir la connaissance, si possible permanente, du niveau de performance de la machine par rapport au niveau de performance optimale désiré dans la définition des objectifs. [14]

I.3. les méthodes de management de maintenance

Au moment de la détermination de la politique de maintenance qui va être mise en œuvre sur un équipement ou une installation, le maintenancier se trouve devant une alternative classique, quel type de maintenance doit-il adapter ?

Traditionnellement les procédures de maintenance dans l'industrie suivent deux directions :
Premièrement, les ingénieurs de maintenance profitent d'une production arrêtée ou ralentie pour inspecter entièrement les machines. Ils remplacent tout naturellement des organes tels que roulements dans les moteurs, pompes, ventilateurs etc., que cela soit nécessaire ou pas.
La seconde approche est de simplement réagir à une panne lorsqu'elle arrive.

A la réflexion, cette méthode traditionnelle de maintenance peut sembler, à une époque de haute technologie, quelque peu dépassée. Pourtant de nombreuses sociétés, y compris les plus grandes, adoptent encore cette approche.

Cependant, utilisant les technologies modernes, une nouvelle approche scientifique fait son chemin rapidement dans la gestion de la maintenance. Un des éléments clef de cette nouvelle approche est la Maintenance Conditionnelle par le Contrôle Vibratoire des Equipements.

Il peut paraître simple de répondre à cette question et une première analyse sommaire conduirait à privilégier la maintenance préventive en croyant, à tort, que cette maintenance préventive va supprimer totalement le risque de panne. En fait la maintenance préventive ne fait que « réduire la probabilité d'apparition d'une défaillance » (NF EN 13306). Une analyse plus approfondie montre que le choix entre maintenance corrective et maintenance préventive demande la connaissance et l'examen d'un certain nombre de critères et de paramètres qui, selon le contexte, auront plus ou moins d'importance et qui induisent ces formes distinctes en fonction des matériels à maintenir dans un état permettant d'assurer un service déterminé:
[15].

Stratégiques :

- Politiques de maintenance adoptées ;
- Recours à la sous-traitance ;
- Recours au travail intérimaire ;

Humains :

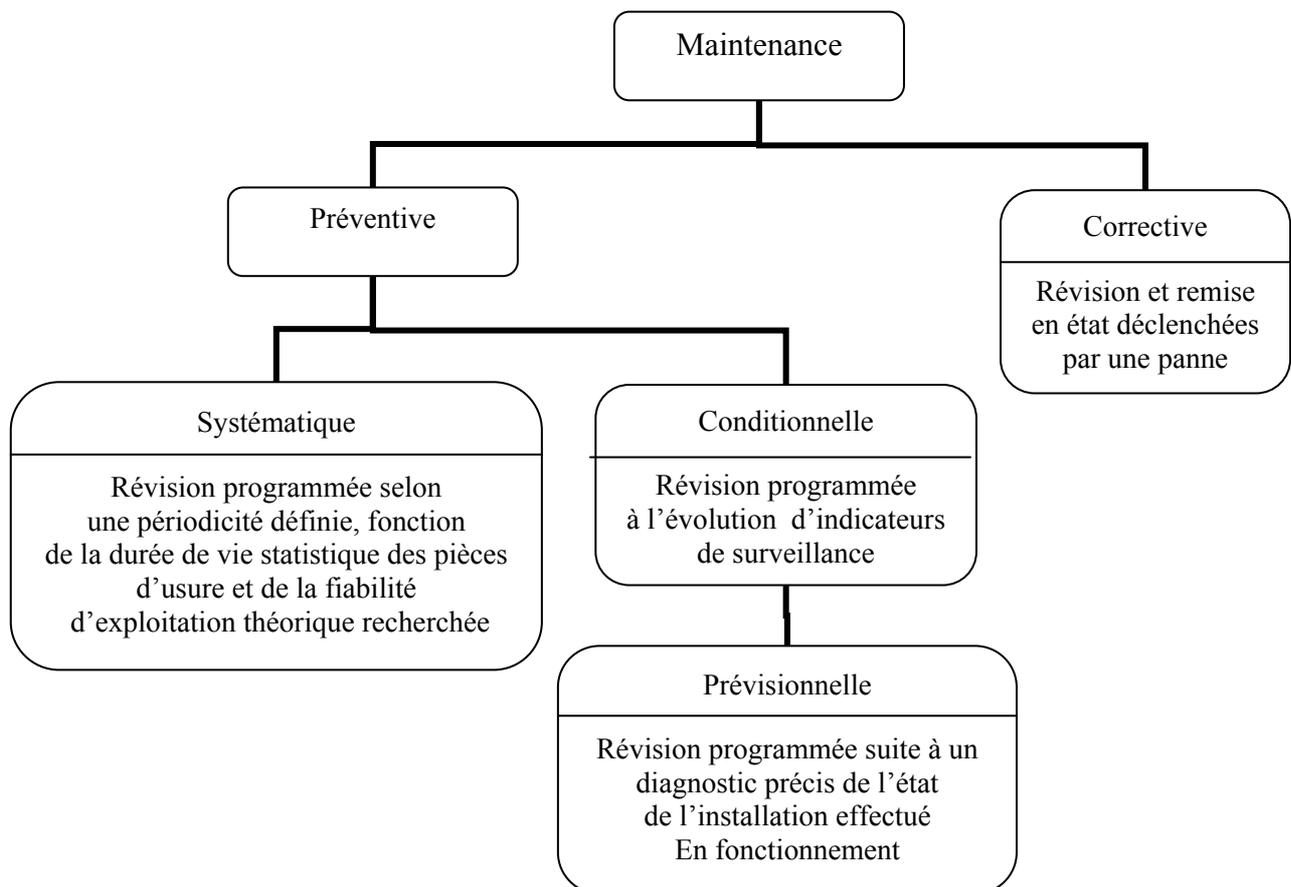
- Effectifs ;
- Niveau de qualification des techniciens;
- Horaires du service;
- Astreintes;

Economiques :

- Politique d'investissement;
- Coût des arrêts de production;
- Coût des interventions de maintenance;

Techniques :

- Technologie des matériels;
- Ancienneté des matériels;
- Vétusté des matériels; [15]

**Fig.I.2: Les stratégies de maintenance [16].**

I.3.1. Maintenance corrective.

I.3.1.1. Définition

La norme NF EN 13306) définit ainsi la maintenance corrective : « Exécutée après détection d'une panne est destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ».

C'est une forme de maintenance dont l'attitude consiste à attendre la panne pour procéder à une intervention.

Il faut distinguer là, deux aspects : la maintenance palliative et la maintenance curative.

- Maintenance palliative : appelée dépannage, dont l'objectif est de supprimer les effets de la défaillance et remettre provisoirement le matériel à un niveau de performance acceptable mais inférieur au niveau optimal [14].
- Maintenance curative : appelée réparation, dont l'objectif est de ramener le système à un niveau de performance optimal.

Son caractère inéluctable ne doit cependant pas faire oublier que cette maintenance doit faire l'objet d'une réflexion approfondie pour être optimisée en mettant tout en œuvre pour intervenir dans les meilleures conditions :

- disponibilité des moyens nécessaires : documentation à jour, pièces de rechange nécessaires, outillages et moyens techniques, etc. ;
- maîtrise par les intervenants d'une méthodologie d'intervention intégrant une méthodologie de diagnostic, etc.

De la même façon, ces défaillances dont on attend l'apparition, seront gérées en amont comme en aval de l'intervention et il sera nécessaire de bien définir la procédure de gestion en ce qui concerne :

- la rédaction d'un compte rendu d'intervention ;
- la mise à jour des documents techniques schémas, plans, etc. ;
- l'optimisation du stock de pièce de rechange.
- Cette exploitation de l'événement défaillance sera aussi l'un des points permettant de définir et d'optimiser ultérieurement la maintenance préventive qui pourra être définie quelle qu'en soit la forme [17].

La solution de maintenance corrective, n'intervenant qu'en cas de panne, est abandonnée dès que les exigences de coûts, de qualité et de sécurité deviennent primordiales. La maintenance devient alors préventive, et peut être systématique ou conditionnelle.

I.3.2. Maintenance préventive

Telle que définie dans la norme précitée, la maintenance préventive est « la maintenance destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien » [17].

Une opération de maintenance préventive est donc une intervention prévue, préparée et programmée en fonction de différents paramètres en vue d'éviter l'apparition probable d'une défaillance identifiée. La gamme des opérations préventives est par conséquent très large:

- Nettoyage technique,
- lubrification,
- visites et inspections réalisées tant à l'arrêt qu'en marche, par les utilisateurs comme par les professionnels de la maintenance,
- contrôles réglementaires,
- révisions partielles ou totales,
- mesure de vibration, analyse d'huile.... [18].

A partir de cette définition générale, on distingue trois variantes qui peuvent être utilisées conjointement en complément l'une de l'autre:

- maintenance préventive systématique ;
- maintenance préventive conditionnelle ;
- maintenance préventive prévisionnelle.

Des lors que le taux de défaillance $\lambda(t)$ estimateur de la fiabilité (exprimé en pannes par heure), peut être obtenu pour des composants, et des systèmes, à partir des retours d'expériences, la vie des équipements se présente en trois phases:

- phase de jeunesse : $\lambda(t)$ décroît rapidement.
- Phase de maturité : $\lambda(t)$ est pratiquement constant.
- Phase de vieillesse : $\lambda(t)$ croît rapidement.

Tous les programmes de gestion de maintenance préventive sont basés sur la période écoulée ou les heures de fonctionnement. La (Fig.I.3) illustre la vie statistique d'une machine (taux de défaillance en fonction du temps, appelée aussi courbe en baignoire).

La première phase indique qu'une nouvelle machine a une probabilité élevée de défaillance, en raison des problèmes d'installations pendant les semaines premières de l'opération, on ne pratique que la maintenance corrective.

C'est seulement dans la seconde phase que la maintenance préventive est justifiée, la probabilité de défaillance est relativement basse pendant une période prolongée. Après cette période normale de vie de cette machine, la probabilité de panne augmente brusquement avec le temps écoulé.

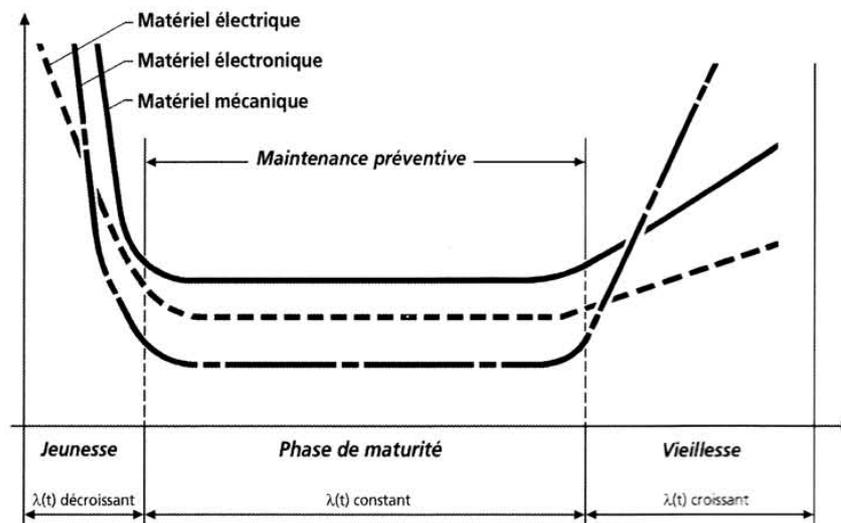


Fig.I.3:Taux de défaillance en fonction du temps [19].

I.3.2.1. La maintenance préventive systématique

D'après la norme AFNOR X 60-010; la maintenance préventive systématique est une forme de maintenance dont « les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unité d'usage » et aussi « les remplacements des pièces et des fluides ont lieu quel que soit leurs états de dégradation, et ce de façon périodique ». [20] Cette définition est illustrée dans la (Fig. I.4) avec :

T : la période d'intervention prédéterminée,
 I_{ps} chaque intervention préventive systématique.

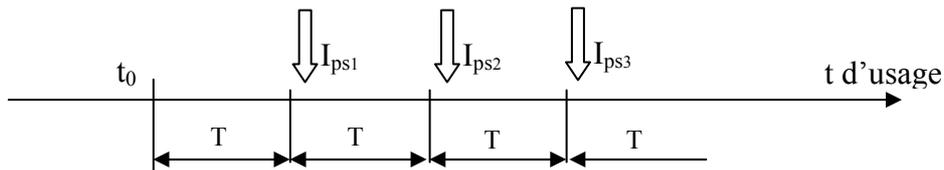


Fig. I.4: Illustration du principe de la maintenance systématique

La période T doit être définie en fonction du risque de panne $MTBF =$ Moyenne des temps de bon fonctionnement.

On a $MTBF = k \cdot MTBF$ (k étant < 0)

Si T est court \Rightarrow coût I_{ps} élevé, si T est long \Rightarrow coût I_{mc} élevé.

Elle peut être justifier par : $C_d > C_{ip}$ (Coût défaillance $>$ Coût intervention préventive), et on peut la déterminer à l'aide des simulations économiques, loi de Weibull et les abaqués d'optimisation.

La maintenance préventive systématique est souvent la première stratégie de maintenance préventive qui est mise en place dans un secteur productif car c'est celle qui a priori, parait la plus simple à mettre en œuvre, mais, elle peut parfois s'avérer onéreuse par le caractère systématique des interventions et des remplacements de pièces sans signe avant-coureur de défaillance.

Cependant, elle se heurte à deux obstacles majeurs qui, s'ils ne sont pas bien identifiés et si on n'y apporte pas de solution satisfaisante, peuvent faire échouer le projet :

1. Détermination précise de l'échéancier d'intervention : cette détermination est basée sur l'expérience, essentiellement sur les données de fiabilité expérimentale, des composants et/ou sous-ensembles concernés. Elle nécessite de connaître suffisamment bien le comportement du bien en exploitation. En effet, intervenir trop tôt conduit rapidement à des coûts prohibitifs qui réduisent à néant les avantages que l'on peut espérer de cette maintenance. Mais intervenir trop tard rend inopérante la maintenance préventive, et on se retrouve placé dans une stratégie de maintenance corrective.

2. Planification des interventions de maintenance systématique : la planification est faite en fonction des arrêts de production planifiés : lorsque l'intervention prévue de maintenance systématique nécessite l'arrêt du bien, il est évident que, sauf circonstances particulières (fonctionnement à « feu continu », risques liés à sécurité,...) cet arrêt de coordination indispensable conduit souvent :

- soit à anticiper les interventions et dans ce cas on risque de perdre tout ou une partie des avantages de la maintenance systématique, avec en particulier une augmentation des coûts liés à une surconsommation de pièces de rechange par exemple,
- soit à retarder la réalisation des interventions avec le risque, difficile à évaluer, d'une défaillance se produisant avant l'intervention. Ce scénario, qui conduit à effectuer de la maintenance corrective subie et non plus gérée, est plus fréquent qu'on ne l'imagine et fait perdre toute crédibilité à la politique de maintenance préventive mise en place [17].

Le systématique s'applique donc, prioritairement, à des matériels à forte valeur ajoutée et/ou vitaux dans le processus de production, à des matériels dont le taux de défaillance est le plus constant, également, aux systèmes dont une défaillance peut présenter un risque aux personnes [15].

I.4. Enjeux de la maintenance

Dans le contexte économique et concurrentiel actuel, la réduction des coûts de production est la clé du développement et de la survie de l'entreprise.

La maintenance a un coût et il importe de trouver le niveau optimum qui maintiendra au moindre coût l'installation à niveau sans mettre en danger la sécurité des personnes. Comme illustré dans la (Fig.I.5), si l'on ne maintient pas l'installation, on aura trop d'incidents et leur coût va croître. À l'inverse, si l'on fait trop de maintenance préventive, le coût total va augmenter.

La maintenance optimale est donc un mélange harmonieux d'entretien préventif et d'entretien correctif, et chaque industrie doit trouver son niveau à atteindre. La surveillance des matériels permet de diminuer le niveau d'entretien préventif sans prendre de risque supplémentaire car on continue à s'assurer que le matériel ne présente pas d'anomalie. On peut donc diminuer les coûts, si toutefois le coût de la surveillance reste limité.

C'est pourquoi la mise en place d'un programme de maintenance, qui permet de répondre à un tel défi, doit réellement être une volonté de la direction et un projet de l'entreprise.

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

- la prévention des risques majeurs: arrêt des machines lorsque les conditions de sécurité (pour l'homme ou pour la machine) ne sont pas satisfaisantes;
- la détection précoce des anomalies: pour éviter au maximum les avaries en remplaçant les composants défectueux si possible avant incident et au meilleur moment ;
- l'analyse après incident: pour remédier aux défauts constatés, et éviter de les retrouver à l'avenir, ou définir les modifications nécessaires [21].

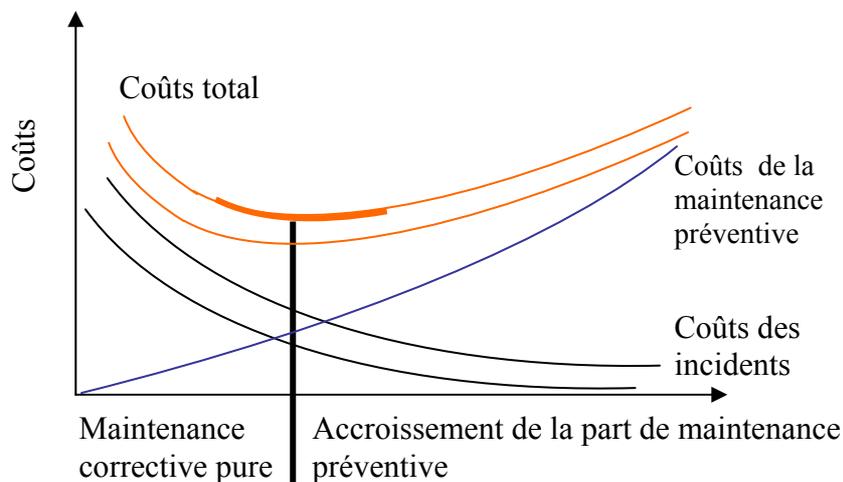


Fig.I.5: Dosage optimal de MP et MC [15-21].

Le défi doit trouver le point optimum d'équilibre, comme représenté sur la (Fig.I.5), il vaut mieux considérer une zone satisfaisante que d'essayer de trouver un point optimum précis. Graphiquement, chaque point sur la courbe du coût total représente la somme des coûts préventifs plus des coûts de maintenance corrective plus des coûts perdus de revenus.

Cependant, la dispersion de géométrie, l'hétérogénéité des matériaux utilisés ou les surcharges d'utilisation peuvent entraîner des défaillances avant la date optimale prévue. C'est pourquoi pour des systèmes mécaniques où la sécurité est un paramètre de grande importance, la maintenance préventive conditionnelle est appliquée.

I.5.Conclusion

La maintenance pose à la fois un problème d'économie et de performance. En effet, certaines machines ne peuvent s'arrêter de fonctionner sous peine d'engendrer d'énormes pertes financières, mais un défaut technique peut aussi nuire à la qualité d'un produit. Dans ce cas, la maintenance corrective est insuffisante et la maintenance préventive devient indispensable.

Cependant, la maintenance systématique est coûteuse car l'usure des pièces dépend beaucoup des conditions de fonctionnement. Elle risque donc d'intervenir trop tôt ou trop tard.

La maintenance conditionnelle, qui s'appuie sur l'analyse de l'état d'une machine, prend alors tout son sens, car elle permet de prendre les décisions d'intervention en connaissance de cause, cette approche sera abordée dans le chapitre II.

Chapitre II

La maintenance préventive conditionnelle

Chapitre II : La maintenance préventive conditionnelle

II.1. Définition

La norme AFNOR X 60-010 définit la maintenance conditionnelle ainsi : « les activités de maintenance conditionnelle sont déclenchées suivant des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service ».

Donc il n'y a plus d'échéancier mais plutôt un événement, une condition, le franchissement d'un seuil, qui provoque l'intervention. Le signal peut être donné par un capteur décelant une dérive de comportement (élévation de température, modification du niveau vibratoire, fuite usure, etc.) à tout type de système pour lequel un capteur sait détecter une anomalie et c'est d'ailleurs grâce au développement de la technologie de ces capteurs que cette forme de maintenance a pu faire de tels progrès ces vingt dernières années. Comme elle peut être appliquée suite d'une inspection ou d'un contrôle.

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

II.2. Maintenance prédictive (prévisionnelle)

La maintenance prévisionnelle est le stade ultime de la maintenance, qui est exécutée « en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien » (norme NF EN 13306).

C'est une approche relativement récente qui repose, comme la maintenance conditionnelle, sur la technologie des capteurs mais privilégie l'évolution des informations qu'ils délivrent plutôt que le simple franchissement de seuils prédéterminés.

Elle est en effet, basée sur l'analyse de l'évolution des paramètres techniques qui permettent de qualifier l'état de bien, et de déceler les dégradations potentielles dès leurs apparitions de façon précise, et permet d'anticiper et de prévoir au mieux le moment où l'intervention devra être réalisée 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 et permet d'optimiser la gestion du stock de pièces de rechange. [22] elle est particulièrement adaptée aux dégradations progressives dont on ignore les seuils [15].

Les informations fournies par les outils de la maintenance conditionnelle peuvent être utilisées mais doivent être regroupées, ordonnées, corrélées. Seul un outil informatique tel qu'un système expert permet une gestion efficace tant au niveau de la synthèse de l'information collectée, des interactions entre les différents paramètres, de l'arborescence des causes de défaillances, qu'à l'élaboration d'éléments de décision permettant de limiter les opérations de maintenance au résultat requis [14].

II.3. Illustration du principe de la maintenance conditionnelle

Puisque la maintenance préventive conditionnelle est définie comme étant celle que l'on réalise uniquement lorsque l'état du bien le nécessite. La conséquence immédiate est qu'il est nécessaire de savoir mettre en place des techniques de surveillance de l'état du bien (fiabilité technique et économique) et surtout d'être capable de qualifier de façon précise l'état de ce bien. Cette opération nécessite de procéder au préalable au choix d'un certain nombre d'indicateurs de surveillance, issu d'un paramètre ou d'une grandeur plus ou moins élaborée dont l'acquisition est le plus souvent possible en fonctionnement.

Un indicateur doit, par définition, caractériser l'état ou les performances d'une machine. Son évolution dans le temps doit être significative de l'apparition ou de l'aggravation d'un défaut ou d'un ensemble de défauts [16].

La (Fig. II.1) illustre le principe de la maintenance conditionnelle.

Elle se rapporte au suivi par mesures périodiques d'une dégradation jusqu'au seuil d'alarme qui déclenche une intervention préventive conditionnelle (notée Ipc).

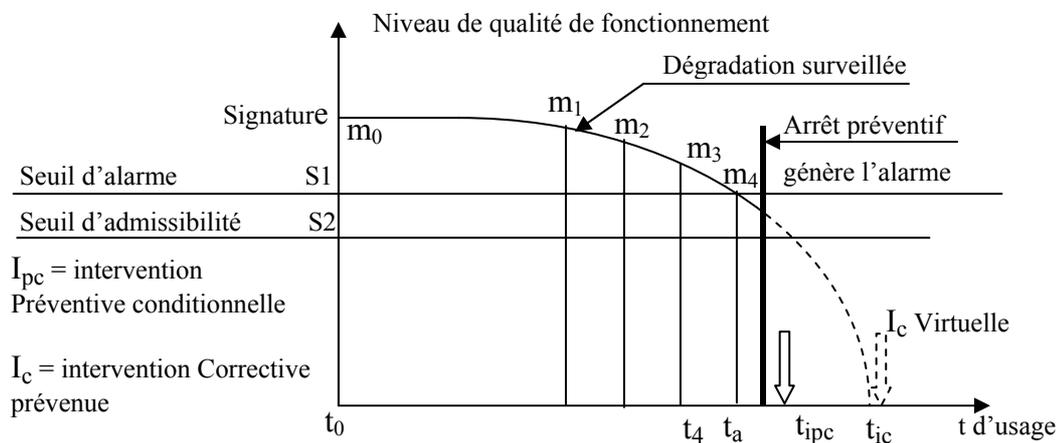


Fig. II.1: Principe de la maintenance conditionnelle [20].

La « signature » est une prise de référence de l'état de « bon fonctionnement » à l'origine.

Les mesures peuvent être de simples observations visuelles, des images (spectre...). Elles peuvent être remplacées par des alarmes préréglées, ou des inspections, espacées de Δt de telle manière que la dégradation à prévenir ne puisse échapper à la surveillance :

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

Les mesures peuvent ne pas commencer à t_0 (sauf signature) si l'on connaît la loi de dégradation.

Les mesures peuvent être collectées par rondes ou « monitorisées » au central de surveillance.

- l'arrêt sera généré automatiquement par l'alarme, ou différé par décision volontaire jusqu'à l' I_{pc} programmée et organisée.
- l'intervention I_{pc} sera programmée à partir de l'alarme, suivant un temps de « réaction » du service maintenance à prédéterminer. Son coût direct C_{Ipc} sera par nature (choix de la dégradation à prévenir) très inférieur au coût (direct + indirect) de la défaillance évitée :

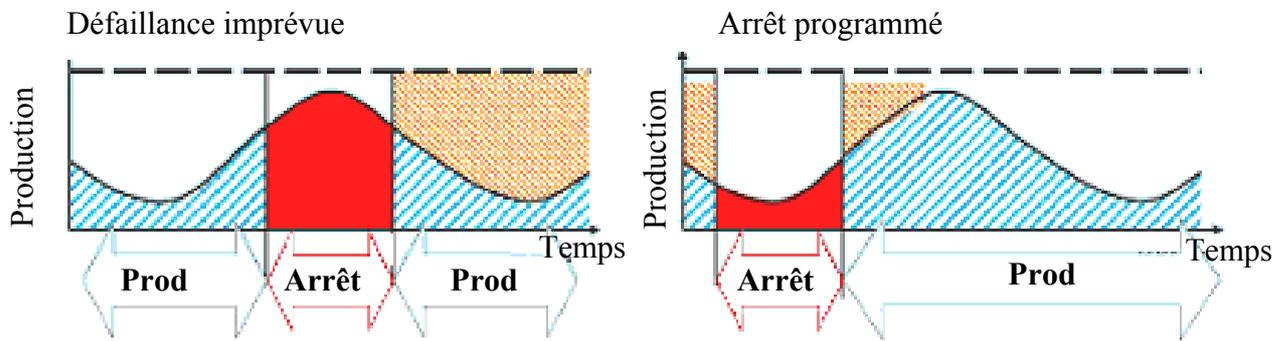


Fig. II.2 : Choix optimal du temps d'intervention de la maintenance et son impact sur la production [24].

II.4. Outils de la maintenance préventive conditionnelle.

Une variété de technologies peuvent, et devraient être utilisée en tant qu'élément d'un programme de maintenance préventive. Puisque les systèmes ou les machines mécaniques occupent la plupart d'équipement d'usine, la surveillance de vibration est généralement la composante clé de la plupart des programmes d'entretien prédictif. Cependant, la surveillance de vibration ne peut pas fournir toutes les informations exigées pour un programme d'entretien préventif réussi.

II.4.1. L'analyse vibratoire

Puisque la plupart des usines se composent des systèmes électromécaniques, la surveillance vibratoire est l'outil préventif primaire de maintenance. L'analyse vibratoire est la plus connue et la plus largement employée. Il faut dire qu'elle permet à elle seule de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Un balourd, un jeu, un défaut d'alignement, un roulement usé ou endommagé... se traduisent par une variation des efforts internes que subit la machine, et donc à une modification de son comportement vibratoire.

Au cours des 10 dernières années, la plupart de ces programmes ont adopté l'utilisation des unités de collecte de données sur microprocesseur et à canal unique et du logiciel Windows®-windows®-based d'acquérir, contrôler, tendre, et évaluer l'énergie de vibration créée par ces systèmes électromécaniques [13].

En plaçant des accéléromètres aux endroits où se transmettent ces efforts (c'est-à-dire sur les paliers des machines), on peut alors suivre l'état de santé de l'équipement. La méthode présente trois gros avantages : les mesures sont faciles à prendre, les défauts sont détectés à un stade précoce, et il est possible de réaliser un diagnostic approfondi pour en connaître l'origine, c'est un peu "la méthode incontournable".

Bien que cette approche soit une méthodologie préventive valable d'entretien, ces limitations de système peuvent limiter les avantages potentiels.

II.4.2. l'analyse des lubrifiants

Un autre outil de surveillance, l'analyse des lubrifiants, comme son nom l'indique, c'est une technique d'analyse qui détermine l'état d'huile ou de graisse utilisée dans l'appareillage électrique mécanique, appliquée à toutes les machines pourvu qu'elles contiennent un fluide (huile ou graisse) que l'on peut prélever. La méthode consiste à "faire parler" les particules d'usure drainées par le lubrifiant, en analysant un échantillon de quelques dizaines de millilitres d'huile (prélevé à l'aide de petites seringues ou lors d'une vidange), afin d'en déduire l'état de l'équipement [23].

Cette technologie ne peut pas être employée pour déterminer la condition de fonctionnement des machines ou détecter les modes de défaillance potentiels. Simplement indiquée, l'analyse d'huile lubrifiante devrait être limitée à un programme proactif pour conserver et prolonger la vie utile des lubrifiants en révélant sa dégradation (suite à une oxydation, à une pollution, à une température d'utilisation trop élevée, etc.). Bien que quelques formes d'analyse d'huile puissent fournir une panne quantitative précise de l'additif individuel et des contaminants chimiques d'huile, révélatrice d'une usure anormale de l'un des composants, ou le mauvais état d'un filtre.

En outre, l'analyse détaillée des propriétés chimiques et physiques de différentes huiles utilisées peut être employée pour programmer des intervalles de changement d'huile basés sur l'état réel d'huile. Dans les grandes et moyennes usines, une réduction du nombre de changements d'huile peut s'élever à une réduction annuelle considérable en coûts d'entretien. Le prélèvement relativement peu coûteux et l'essai peuvent montrer, quand l'huile dans une machine a atteint un point où les garanties changent [13].

Donc Les applications primaires de l'analyse d'huile sont : " contrôle de qualité, réduction d'inventaires d'huile de graissage, et détermination de l'intervalle le plus rentable pour le changement d'huile".

Cependant, l'emploi de cette technique dans un programme de maintenance préventive conditionnelle, est associée à trois limitations principales : le coût d'équipement, le prélèvement précis des échantillons d'huile, et enfin l'interprétation des données.

II.4.3. Thermographie

La thermographie infrarouge suscite un intérêt encore récent dans le domaine de la maintenance. Jusqu'alors, réservée au contrôle d'installations électriques, elle est depuis peu utilisée dans la surveillance des machines tournantes et des structures.

Elle emploie l'instrumentation conçue pour surveiller l'émission de l'énergie infrarouge (température de surface) pour déterminer la condition de fonctionnement. En détectant des anomalies thermiques (les secteurs qui sont plus chauds ou plus froids qu'ils devraient être), un technicien expérimenté peut localiser et définir une multitude de problèmes naissants au sein de l'usine. La technologie infrarouge est affirmée sur le fait que tous les objets ayant une température au-dessus de l'absolu zéro émettent l'énergie ou le rayonnement. Le rayonnement infrarouge est une forme de cette énergie émise [23].

Le système optique, les détecteurs de rayonnement, et d'autre forme d'indicateur sont les éléments de base d'un instrument infrarouge industriel. Le système optique rassemble l'énergie sur un détecteur, qui le convertit en signal électrique, ensuite un instrument électronique amplifie le signal de sortie et le transforme en une forme affichable [13].

La thermographie permet donc de réaliser des mesures distances, et d'obtenir instantanément une image thermique de la zone inspectée.

Enfin, il existe d'autres méthodes moins répandues que les précédentes mais, néanmoins intéressantes. Citons par exemple l'analyse acoustique, qui permet de détecter tout bruit anormal à l'aide de microphones placés (le plus souvent) à distance de l'équipement, ou le contrôle ultrasonore, qui permet de détecter des défauts de faible amplitude à haute fréquence (tels que l'initiation de la dégradation d'un roulement) [23].

II.5. Le Choix de l’outil de surveillance

Toutes les méthodes qu’on a déjà vues, ne permettent pas de “voir” les mêmes types de défauts, ni de réaliser un diagnostic approfondi pour en connaître l’origine et la gravité du défaut. En outre, chaque méthode a son champ d’application privilégié, voir « tableau II.1, et Tableau II.2 » donc avant de choisir, il faut bien cerner la criticité de sa machine, et définir le type de surveillance qu’elle nécessite.

II.5.1 Elément de comparaisons entre les différentes méthodes de l’entretien préventif.

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

Tableau.II.1: Choix de l’outil de surveillance [23].

II.5.2. les Principales méthodes de détection suivant les défauts potentiels

Type de défauts	Analyse vibratoire	Thermographie IR	Analyse d'huiles	Analyse acoustique
Déséquilibres, balourd	Oui	Non (sauf s'il y a usure)	Oui (s'il y a un échauffement)	Non
Jeux, défauts de serrage	Oui	Non (sauf s'il y a usure)	Oui (s'il y a un échauffement)	oui (s'il y a une résonance)
Défauts spécifiques aux roulements	oui	oui	oui	Oui
Défauts spécifiques aux engrenages	oui	oui	oui	Oui
Défauts de courroies	Oui	Non	Oui	Oui
Défauts d'alignement	Oui	Non	Oui	Non
Défauts liés à la lubrification : - dégradation de la qualité de l'huile	Non (sauf paliers fluides)	Oui	Non	Oui
manque d'huile	Oui	Oui	Oui	Oui
Défauts de nature électrique ou électromagnétique	Oui	Non	Oui	Oui
Défauts liés aux écoulements (pour pompes et machines hydrauliques)	Oui	Non	Non	Oui

Tableau. II.2: Classement des défauts suivant les méthodes de détection [23].

II.6. les objectifs visés par la maintenance conditionnelle [15-19-24]

II.6.1. Améliorer la fiabilité du matériel

La mise en œuvre de la maintenance préventive conditionnelle nécessite les analyses techniques du comportement du matériel. Cela permet à la fois de pratiquer une maintenance préventive optimale et de supprimer complètement certaines défaillances.

II.6.2. Garantir la qualité des produits

La surveillance quotidienne est pratiquée pour détecter les symptômes de défaillance, et veiller à ce que les paramètres de réglage et de fonctionnement soient respectés. La qualité des produits est ainsi assurée, et l'augmentation du rendement est plus sensible.

II.6.3. Améliorer l'ordonnancement des travaux

Les machines de production étant surveillées en permanence, le risque d'avarie grave et inattendue est pratiquement nul. Cette garantie de fonctionnement sans interruption lourde permet d'envisager une réduction des en-cours de production, et une diminution du nombre d'arrêts de production intempestifs. Cela implique une bonne coordination entre les deux services (production et maintenance) pour la planification des interventions et le respect du planning.

II.6.4. Assurer la sécurité humaine et la sûreté de fonctionnement

La préparation des interventions de maintenance préventive ne consiste pas seulement à respecter le planning; elle doit tenir compte des critères de sécurité pour éviter les imprévus dangereux.

II.6.5 Améliorer la gestion des stocks

La surveillance rapprochée permet le fonctionnement d'organe jusqu'au maximum de leur durée de vie évitant ainsi la dépose et le rebut d'éléments encore capables. Ainsi, il en ressort une diminution sensible des stocks nécessaires de pièces de rechange, avec l'approvisionnement des pièces de rechange selon les besoins réels. La précision des seuils d'alarme et une bonne organisation aident à planifier les interventions et concourent à des commandes de remplacement en juste à temps.

II.6.6 Améliorer le climat de relation humaine

Une panne imprévue est souvent génératrice de tension. Le dépannage doit être rapide pour éviter la perte de production. Certains problèmes, comme par exemple le manque de pièces de rechange, entraîne l'immobilisation de la machine pendant longtemps, ce qui provoque une tension entre la production et la maintenance.

En outre, la maintenance préventive conditionnelle valorise et motive le personnel du service par l'utilisation de techniques modernes pratiquées avec du matériel de haute technologie qui concoure à des interventions plus ciblées et bien organisées (localisation préalable des pannes).

II.6.7 Réduction du coup global de maintenance

La maintenance conditionnelle a pour principal objectif l'amélioration et l'augmentation de la disponibilité des équipements. Pour cette forme de maintenance, les arrêts systématiques sont supprimés et l'augmentation du rendement est plus sensible.

Le coup global de la maintenance est allégé car, la surveillance permet de déceler les petits défauts de conception ou de fonctionnement, de plus, l'observation de l'évolution d'une dégradation évite les destructions d'organes voisins par défaillance secondaire. Le risque de casses importantes et traumatisantes pour l'ensemble d'une machine, étant écarté, la durée de vie des systèmes est allongée.

II.7. Eléments de comparaison

II.7.1. Maintenance corrective

Bien que, la défaillance engendre souvent des avaries en chaîne et des dégâts importants, les réparations sont effectuées dans des conditions difficiles puisque imprévues. Les contrôles des temps sont délicats, et le maintien d'un taux de disponibilité suffisant de l'installation n'est possible qu'au prix de la redondance du matériel, de l'existence d'un stock de rechange important ou de l'assurance de la disponibilité de ces rechanges, de la présence de personnel qualifié pour les interventions (coût de la main-d'œuvre élevés d'heures supplémentaires).

L'analyse des coûts d'entretien a prouvé que dépanner en mode réactif (c.-à-d., après la panne) sont normalement trois fois plus grands que même dépanner sur une base programmée. [15]

Pour pallier à cet inconvénient, l'installation peut être organisée en modules que l'on remplace par « échange standard » en cas de défaillance. Le nombre d'interventions reste en revanche faible.

II.7.2 Maintenance préventive systématique

Le taux de défaillance est faible puisque les défaillances prévisibles sont théoriquement éliminées, mais les défaillances soudaines ne le sont pas. Les interventions sont programmées dans le temps, ce qui améliore la gestion des personnels et des rechanges nécessaires ainsi que l'adéquation des opérations de maintenance avec les impératifs commerciaux :

- bonne planification des opérations et des ressources;
- contrôle du niveau de stockage des pièces de rechange.

Le nombre et la durée des interventions sont élevés et le remplacement systématique d'éléments ayant encore un bon potentiel n'est pas rare (l'entretien n'est pas fonction de l'état de la machine, mais plutôt de la durée d'utilisation). Enfin, la multiplication des interventions augmente le risque d'erreurs humaines susceptible d'être à l'origine d'une nouvelle avarie.

II.7.3. Maintenance préventive conditionnelle et maintenance prévisionnelle

Maintenance relativement coûteuse par la technologie qu'elle suppose, et de sa mise en œuvre d'exiger un nombre important de capteurs et de systèmes de traitement de l'information qui sont eux-mêmes des sources de défaillances. Elle présente néanmoins l'extrême avantage de pouvoir être appliquée à des matériels dont le comportement est peu ou pas connu. Elle offre malgré tout l'intérêt de pouvoir éviter un aléa tout en exploitant les composants au maximum de leur durée de vie'' l'accroissement de la durée de vie des pièces par rapport à une politique de changement systématique'' par le remplaçant des pièces défectueuses uniquement, donc la suppression des défauts de jeunesse lors de la remise en route après un entretien systématique. De plus, le nombre d'interventions est réduit au strict nécessaire, avec une amélioration de la disponibilité et de la sécurité, pour un taux de défaillance faible [14].

Les moyens de surveillance et de suivi, nous l'avons vu, sont multiples et variés. Si dans la plus part des cas le procédé s'impose de lui-même, souvent la difficulté repose sur le choix le plus judicieux à opérer. Voire même le recours à plusieurs techniques différentes s'impose parfois pour regrouper les informations.

Ainsi donc la maintenance préventive conditionnelle requiert de solides compétences en technique et analyse et une formation régulièrement actualisée pour des techniciens.

Le choix des moyens doit être judicieusement effectué et présenter un compromis idéal entre investissement et rentabilité attendue. Lors de la mise en place d'une maintenance préventive conditionnelle, une prise en compte de critères tels que ceux qui suivent doit permettre des choix :

- nombre de points de surveillance ;
- gravité de la dérive d'état ;
- incidence de l'avarie sur la sûreté de fonctionnement ;
- coût de mise en œuvre et coût d'usage;
- formation des techniciens... [14- 15-25]

II.8. Choix d'une politique de maintenance

Vue que la maintenance exige une combinaison rationnelle des moyens et qu'elle est permanente, elle nécessite une politique d'entretien préalablement établie.

Les travaux de recherche dans le domaine maintenance ont pour objectif de définir une politique de maintenance préventive conditionnelle basée sur l'utilisation d'outils adéquats et adaptée à un système mécanique complexe. 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 interventions de réparation (Fig. II.3) [5].

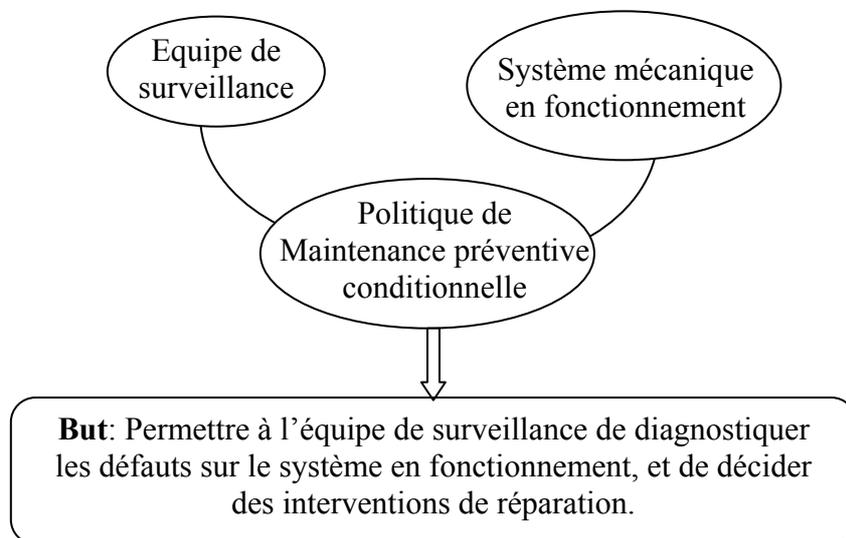


Fig. II.3: Enoncé de la fonction globale d'une politique de maintenance préventive conditionnelle

En général, la politique c'est « l'art de gouverner », mais la politique de la maintenance c'est de définir au niveau de l'entreprise des objectifs technico-économiques, souvent doublés d'impératifs de sécurités et de contraintes réglementaires (normes anti-pollution par exemple) relatifs à la prise en charge des équipements par le service de maintenance.

Le choix de cette politique de maintenance est déterminé par le calcul du coût global de durée de vie (life cycle cost.), en se basant sur des contraintes bien identifiées,

A long terme, il s'agit d'abord de juger de la durée de vie optimale d'une machine en estimant la somme des coûts suivants :

- coût d'achat A ;
- coût de fonctionnement f ;
- coût total de maintenance M ;
- valeur de revente éventuelle VR ;

Le coût global vaut :

$$CG = A + f + M - VR$$

Le coût total de maintenance ayant tendance à augmenter avec l'âge de la machine, et la valeur de revente à diminuer, il est intéressant de déterminer la durée au bout de laquelle on atteint un minimum. [14] Cette durée de vie optimale correspond à l'abscisse du point de contact de la tangente à la courbe passant par l'origine (Fig.II.4).

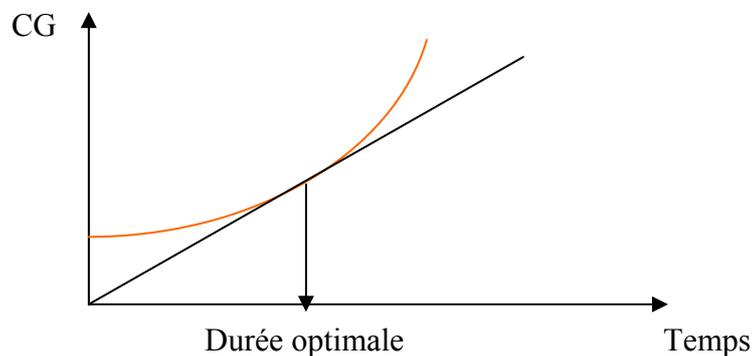


Fig.II.4: Détermination de la durée de vie optimale [14].

Le coût total de maintenance étant réalisé, il faut choisir pour chaque machine ou groupe de machines un type de maintenance appropriés.

On peut utiliser des critères de choix simple, résumés par des arbres (Fig. II.5).

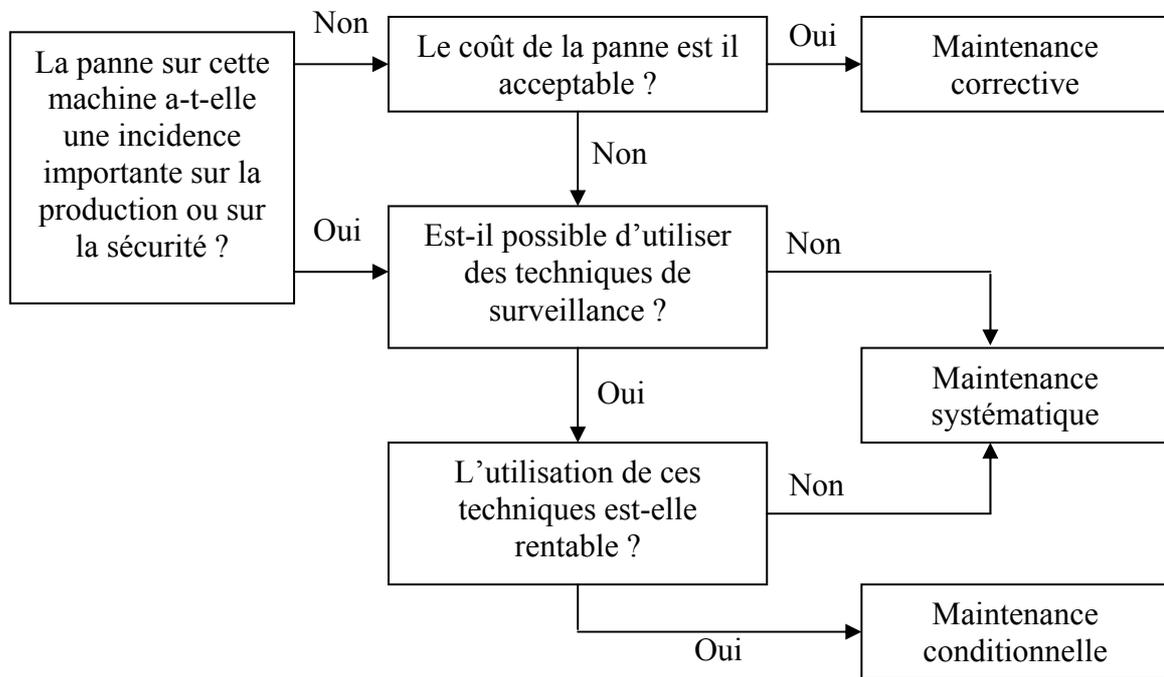


Fig. II.5: Choix d'une politique de maintenance [14].

Dans le premier cas, nous suivons l'évolution du taux de panne du composant en fonction du temps. Nous choisissons le type de maintenance en fonction de l'évolution de ce taux, de l'incidence sur la sécurité et la progressivité de la panne.

On peut aussi dans le deuxième cas, estimer pour chaque élément, le rapport entre le coût c d'une intervention préventive effectuée dans de bonnes conditions, et le coût C supplémentaire supporté en cas de défaillance.

Si ce rapport C/c est négligeable, la maintenance corrective est la plus intéressante. S'il est élevé, une maintenance préventive systématique ou conditionnelle s'impose. Selon que le composant présente des paramètres mesurables (huile dans une boîte à vitesse, éléments tournants, etc.), il faut choisir la maintenance conditionnelle sinon la maintenance systématique est adoptée.

On peut alors classer les éléments de la machine en fonction de la valeur de ce rapport en :

- vital (C/c élevé) ;
- important (C/c moyen) ;
- secondaire (C/c faible).

L'efficacité de la maintenance s'appuie sur une connaissance exhaustive du matériel et de son comportement. Il est utile de connaître l'évolution dans le temps de la fiabilité des éléments vitaux et de pouvoir préciser leurs types de défaillances probables. Ces connaissances

proviennent de l'expérience sur le terrain mais aussi de l'exploitation statistique des défaillances constatées.

Le dossier machine, aussi appelé dossier technique d'équipement ou dossier de maintenance, est la référence permettant la connaissance intime d'un équipement, son origine, ses technologies et ses performances. La documentation relative à la connaissance individualisée d'une machine, de ses défaillances, de sa santé, est appelée dossier historique [19]. Ce dernier ne doit pas contenir trop d'informations pour ne pas nuire à son efficacité, mais s'il est trop succinct, il devient inutile, il comprend essentiellement deux parties :

La première concerne le fabricant, appelé dossier constructeur. Cette partie contient tous les documents fournis par ce dernier, la correspondance échangée et les documents contractuels qui lient le constructeur à l'entreprise.

La deuxième partie, appelée fichier interne, correspond à un fichier standard, établi et mis à jour par le bureau de méthodes. Il doit être bien constitué pour être opérationnel, et il doit adapter les détails descriptifs et les informations aux besoins des agents de maintenance, en préparation ou en intervention. Le deuxième document contient les informations techniques fournies par le constructeur.

Il appartient au service de maintenance, lors des négociations d'achat, d'exiger les documents qui lui seront ultérieurement utiles, tels que :

- les caractéristiques de la machine : capacités, performances en consommation, puissance installée, etc.;
- les plans détaillés de tous les circuits, schémas et plans électriques, électroniques, hydrauliques ou pneumatiques;
- les consignes de sécurité et la notice de maintenance;
- la notice de lubrification qui contient le type de lubrifiant, les points à graisser, les fréquences conseillées, etc.;
- les organigrammes de dépannage, les documents d'aide au diagnostic des défaillances les plus probables, etc. [26].

II.9. la mise en œuvre d'une maintenance conditionnelle

La mise en place d'un programme de maintenance prévisionnelle et sa pérennité nécessitent une préparation minutieuse (Fig.II.6) qui peut se scinder en trois phases : l'étude de faisabilité, le choix des acteurs et le démarrage du programme.

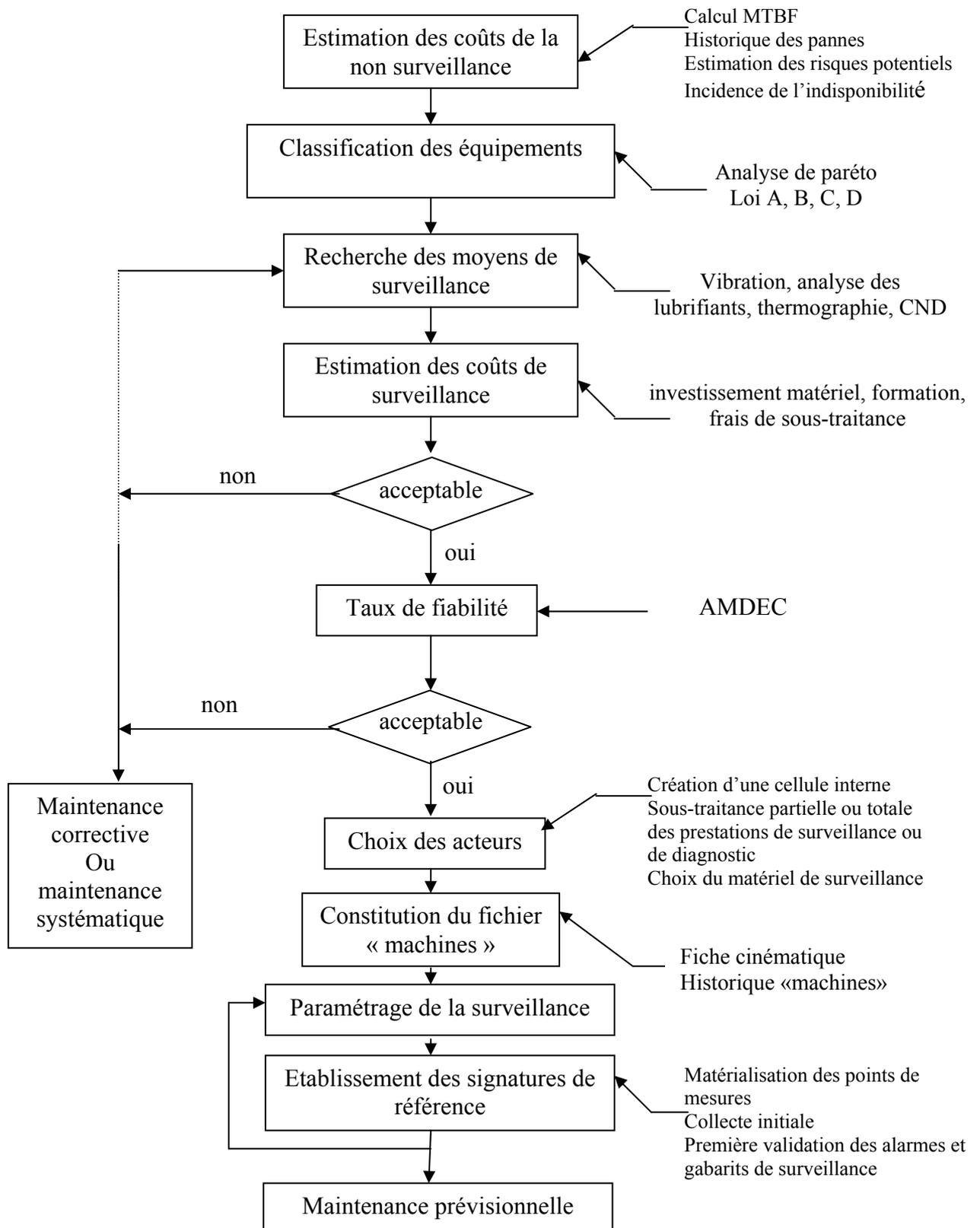


Fig.II.6: Le chemin logique de la mise en œuvre [16].

La méthodologie de la mise en œuvre d'une maintenance conditionnelle est proposée, en plusieurs étapes successives qui permettent de poser le problème de la maintenance conditionnelle à partir d'une défaillance à prévenir avant de choisir les matériels nécessaires, d'organiser la surveillance et de préparer l' I_{pc} .

- ◆ Sélection des défaillances à prévenir
- ◆ Sélection d'un (ou n) paramètre physique descriptif de l'évolution du défaut
- ◆ Choix des capteurs
- ◆ Choix du mode de collecte des informations
- ◆ Suivre le paramètre descriptif dans le temps à l'aide de courbes de tendance (maintenance continue ou périodique, périodicité à définir.)
- ◆ choix du traitement de l'information.
- ◆ Établir des seuils limites d'avertissement (pré- alarme.).
- ◆ Établir le diagnostic de défaut.
- ◆ Prédire la date de bris (extrapolation de courbes.).
- ◆ Commander les pièces de rechange.
- ◆ Organisation de l'intervention conditionnelle I_{pc} .
- ◆ Bilan d'efficacité et retour d'expérience [25].

II.10. Optimisation de la maintenance conditionnelle prévisionnelle

Beaucoup de programmes de maintenance conditionnelle ou prévisionnelle mis en application, donnent des résultats jugés insuffisants et en dessous des espérances.

Ces résultats quelques peu décevants n'ont pas été provoqués par la limitation de technologie, mais plutôt par deux problèmes importants concernant respectivement, la gestion et le financement notamment:

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

Comme minimum vitale, les étapes proactives suivantes peuvent éliminer ces restrictions et en conséquence aider à gagner les avantages maxima du programme de la maintenance prévisionnelle.

II.10.1. Changement de Culture

La première intervention doit changer la perception, que les technologies prévisionnelles sont exclusivement un outil de gestion de maintenance ou outil d'empêchement de panne. Ce changement doit intervenir au niveau de corporation et imprégner dans toute l'organisation de l'entreprise. La plupart des directeurs avec une vision étroite, ne peuvent pas comprendre que la plus part des pannes et des échecs ne sont pas issus de la maintenance.

Les études réalisées, au cours des 30 dernières années, sur les problèmes de fiabilité des équipements, montrent que la maintenance est responsable d'environ 17% d'arrêt de production et de problèmes de qualité. Les 83 % restants sont totalement en dehors de la responsabilité traditionnelle de la fonction maintenance [13]. Le fonctionnement inadéquat, mauvaise conception, non spécifications des pièces, et une myriade d'autres raisons.

Des technologies prévisionnelles devraient être employées comme outil d'optimisation, elles sont employées pour détecter, isoler, et fournir des solutions pour toutes déviations du bon fonctionnement, qui ont comme conséquence la réduction de capacité, la mauvaise qualité, les coûts anormaux, ou la menace à la sûreté des gens. Ce rôle critique ou cette approche nécessite une équipe ou un groupe de travail qui a l'autorité et l'indépendance hiérarchique pour décider, et avant tout, elle doit avoir une connaissance complète des machines et de conception du processus, pour pouvoir mettre en application les solutions optimales. Le suivi de maintenance que j'ai observé durant mon stage présente quelques insuffisances concernant l'optimisation et l'exploitation du logiciel DIVA qui malgré ses performances d'expert dans la gestion de l'analyse d'huile et process, reste sous exploité car ces options sont mises en veilleuse et ne profite aucunement à la tâche de maintenance, en tant qu'un indicateur complémentaire efficace pour une meilleure qualité de surveillance optimale.

II.10.2. Utilisation appropriée des technologies prévisionnelles

Quand on pense à l'entretien prévisionnel, la surveillance vibratoire, la thermographie, où l'analyse d'huile est la vision normale. Toutefois La combinaison de ces trois technologies est

le minimum nécessaire pour un programme d'entretien prévisionnel efficace qui éliminera presque entièrement les défaillances catastrophiques et le besoin de maintenance corrective.

Utilisé séparément ou en association, ces outils puissants, ne sont pas la panacée pour tous les problèmes, et ne peuvent pas fournir tout le diagnostic exigé pour réaliser et soutenir des niveaux de performance.

Pour gagner l'avantage maximum de ces technologies prévisionnelles, des considérations importantes sont nécessaires: Les paramètres de processus, tels que les débits, le temps de conservation, les températures, la charge, la vitesse et d'autres, qui sont des conditions absolues dans l'optimisation de la maintenance.

Le système est composé de plusieurs composants, tels que les pompes, les boîtes de vitesse, et ainsi de suite, qui doivent fonctionner dans une enveloppe de conception de sorte que le système puisse atteindre ses niveaux de performance conçus. Pour cette raison le programme prévisionnel doit traiter le composant, en tant qu'élément de toute la machine et non pas en tant qu'élément d'un système intégré.

La plupart d'utilisation de technologie prévisionnelle limite l'analyse au diagnostic simple de l'état mécanique de ce composant indépendamment du système, négligeant ainsi l'influence des variables du système, et les paramètres de processus, ou l'instabilité sur le composant, qui sont souvent la cause principale du défaut. Dans ce cas, on est devant une correction des symptômes (par exemple, roulement, mauvais alignement), et loin du problème réel.

Un exemple simple de cette approche est un compresseur centrifuge. Si la charge change de 100% à 50% en fonctionnement, la vibration résultante augmente par un facteur de quatre. Par conception, la charge de 100% agit sur le compresseur en tant que force stabilisante sur l'élément tournant, quand la charge est réduite à 50 %, la force stabilisante est réduite d'un demi d'où une augmentation de l'amplitude vibratoire de 400% [13].

Par conséquent, le système doit être le centre primaire de l'analyse.

II.10.3. Sélection des machines à surveiller.

Faire de l'entretien conditionnel prévisionnel, est avant tout, un choix économique. Il doit être appliqué pour les systèmes ou les machines critiques, dont la panne ou la dégradation, nuit à la sécurité ou à la production, bien que le matériel secondaire soit important.

Cette réflexion préliminaire doit être menée en analysant le coût réel de chaque panne ou incident, c'est-à-dire en prenant en compte non seulement les coûts directs de la réparation, mais aussi les coûts indirects qui représentent, en général, la partie la plus importante des pertes enregistrées. (Fig. II.7)

La surveillance se limite alors aux machines réellement stratégiques pour la production, auxquelles il faut ajouter les machines à problèmes (panne fréquente, démontage difficile) et les machines dangereuses.

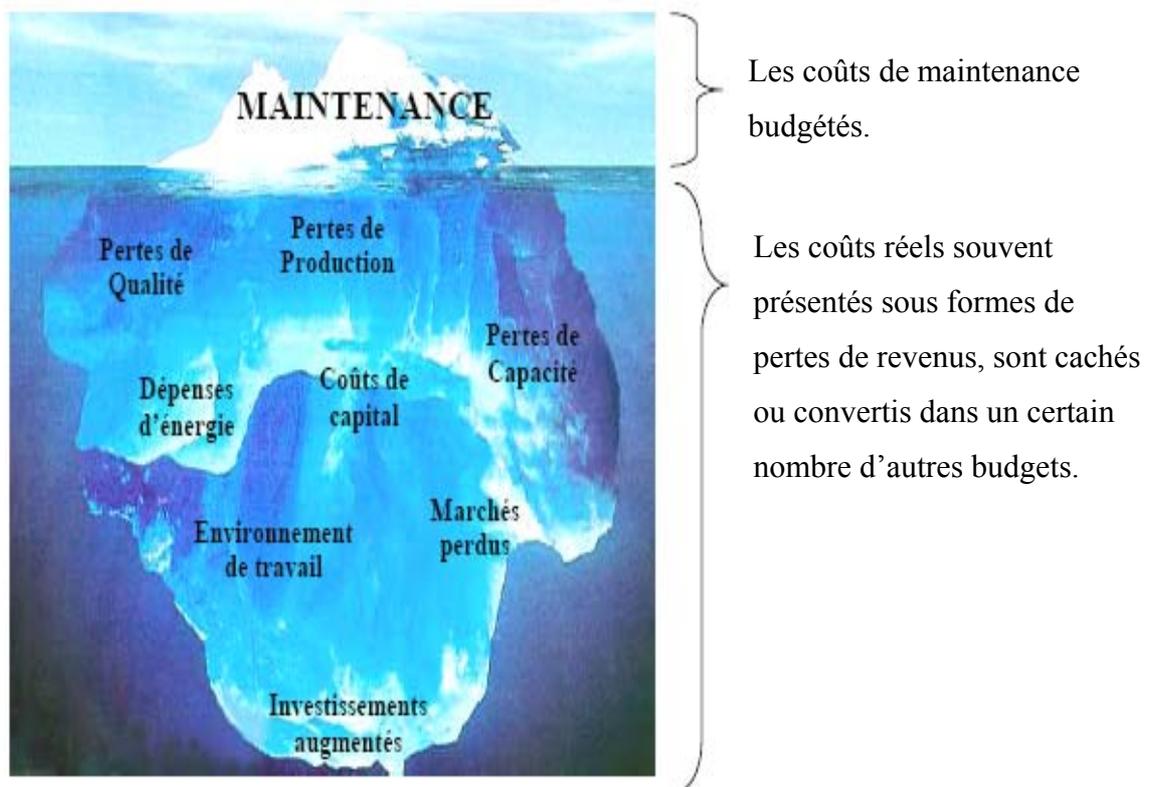


Fig. II.7: Iceberg des coûts [27].

II.11. Constatations et recommandations

Lorsqu'on connaît le coût d'une interruption de production dans une grande ligne, on comprend mieux pourquoi les entreprises et les chercheurs ont investi dans le développement de procédures de maintenances préventives.

Il serait cependant peu réaliste et dangereux de penser que la fiabilité d'une surveillance repose uniquement sur le traitement des informations délivrées par des capteurs ou véhiculées par un lubrifiant. L'inspection visuelle régulière d'un parc de machines, qui est en fait la première forme de surveillance apparue, fait partie intégrante de toute stratégie de maintenance et ne saurait être abandonnée dans le cadre d'une maintenance conditionnelle ou prévisionnelle. Dans la plupart des cas, cette forme de surveillance permet de détecter la présence de défauts potentiellement générateurs d'incidents graves à court terme oubliés par les autres techniques de surveillance (fuites de garniture Cas qui s'est produit plusieurs fois à la cimenterie de l'Hamma Bouziane).

Dans les entreprises, c'est l'activité de maintenance préventive qui est la plus lourde en ressources humaines et matérielles. Mais c'est en partie grâce à elle qu'un outil industriel possède une disponibilité opérationnelle élevée. Encore faut-il que cette fonction "maintenance préventive" soit analysée, optimisée et valorisée au sein des unités de production. De ce fait nous faisons remarquer quelques aberrations concernant l'état et la qualité de la maintenance tel que pratiquée dans le secteur industriel investi et examiné durant ma période de stage, que l'on peut résumer comme suit :

1- incompatibilité de l'équation de la présence du personnel technique de maintenance avec le gabarit des machineries concernées par le suivi et l'entretien. En effet la surveillance On-line est programmée pour le suivi de 15 machines stratégiques effectives, cependant, le nombre de responsables techniques n'est pas en proportion avec le gabarit des machines en activité, car il est limité d'une part seulement à deux personnes, parfois à une seule personne, d'autre part la qualification du niveau de compétence est excessivement insuffisante, car elle est basée uniquement sur la bonne volonté et l'expérience, avec un manque de soutien en terme de formation continue effective, qui doit être programmée afin de tenir compte des problèmes réels de terrain et rester à l'écoute des problématiques réels qui sont générés sans cesse par les impératifs de terrain.

2- les conditions d'achat du logiciel concernant le suivi de maintenance On-line, apparemment, sont basés uniquement sur le facteur coût en minimisant les options potentielles disponibles, au dépend de certains besoins indispensables à la bonne démarche des tâches techniques nécessaires. A titre indicatif le choix du nombre de points de mesure, la plage fréquentielle potentielle constitue des facteurs d'efficacité stratégique et incontournable.

Cette mauvaise tendance concernant l'achat et la refonte du matériel, en se basant uniquement sur le facteur coût, est en fait très répandue dans nos entreprises et doit être remédiée, en faisant appel aux techniques d'optimisation, qui résume non seulement le besoin de réaliser un bon coût économique dans l'achat du matériel, mais aussi, sans perdre de vue la nécessité de garantir le rôle efficace et performant du matériel dans l'accomplissement des tâches techniques à courte, moyenne et longue durée.

3- Sous exploitation du logiciel concernant l'exploitation de la base de données inhérente au fichier de mémoire et de gestion, par le simple fait de l'ignorance, et par manque de formation. Durant le stage, on a pu, contribuer à la résolution du problème de la sauvegarde et de la récupération des données de suivi, qui a été totalement négligée par ignorance ; d'autre part, malgré la disponibilité du matériel VIBSCANNER pour la surveillance OFF-LINE, il n'est pas exploité pour le service d'investigation importante comme l'équilibrage des rotors, ainsi que l'analyse des roulements par onde de chocs. La seule cause de cette insuffisance étant le manque de formation, qui aurait dû accompagner la transaction lors de l'achat du matériel.

4- Le service de maintenance ne doit pas rester subordonné aux caprices du service de production qui en fait, trop occupé pour maintenir son rendement de production, monopolise le pouvoir de décision dans la tâche typique «qui fait quoi, quand et comment?» et cela, sans coordonner ou prendre compte de l'avis du service de maintenance.

5- Le duel permanent entre les deux services de maintenance et de production doit être réduit à son minimum, en rappelant, le besoin étroit de complémentarité et l'esprit d'équipe, tant nécessaire afin de garantir le devenir de l'entreprise qui constitue l'intérêt commun, et pouvoir faire face aux défis de la concurrence sans cesse grandissante. Cependant, afin de récupérer son pouvoir de décision, le service de maintenance doit fournir un seuil de compétence, non pas seulement dans la tâche de maintenance corrective, mais aussi doit présenter des procès verbaux (PV) de suivi technique et économique suffisamment convainquant. A titre indicatif l'impact économique de la maintenance pourrait constituer une problématique pour les étudiants en fin de mémoire et de magister.

6- On a remarqué aussi que le remplacement continu des agents techniques de maintenance ne tient pas compte de l'expérience acquise. En effet, l'agent désigné pour la tâche de

maintenance, une fois adapté et est à peine préparé pour accomplir son rôle, malheureusement, subit une mutation pour d'autre fonction, en laissant un vide technique qui nécessite un remplacement coûteux en termes d'expérience et de coût de formation. En plus une carence certaine n'est pas prise en compte concernant la relève du personnel de maintenance.

II.12.Conclusion

La maîtrise dans la pratique d'une maintenance gérée rationnellement pourra soulager notre industrie. Le problème étant de savoir dans quelle mesure cela est possible et couramment renforcer la gestion dans l'approche d'une fonction maintenance plus adéquate répondant à nos propres conditions industrielles. Il faudrait oser investir dans une gestion rationnelle de politique de maintenance car la théorie et la pratique le confirment.

Il est vrai également que, dans certaines entreprises, la maintenance préventive a été hypertrophiée, générant plus de dépenses que gains potentiels. Ceci montre que la maintenance préventive n'est pas une panacée et que le « tout préventif » n'est pas sauf exception, la finalité ultime. Donc la meilleure stratégie de maintenance sera celle qui, dans un contexte donné, assurera un équilibre entre maintenance corrective et maintenance préventive permettant d'une part, à chacun des critères d'être à son optimum et, d'autre part, d'attendre les objectifs fixés en termes de disponibilité. Cependant la maintenance ne peut imposer sa vision à long terme que si elle n'est pas en état de dépendance (hiérarchique et budgétaire) par rapport à la production.

CHAPITRE III

La surveillance des équipements

Chapitre III : la surveillance des équipements

III.1.Introduction

L'évolution technologique, faite ces dernières années, dans les domaines de l'informatique industrielle de l'instrumentation numérique d'analyse des systèmes de surveillance des machines tournantes a permis de mettre en place de nouvelles stratégies de surveillance et maintenance des installations et machines complexes. La protection des machines est assurée par le déclenchement d'une alarme ou par l'arrêt de la machine si l'amplitude de la vibration atteint des valeurs jugées excessives pour le bon fonctionnement ou l'intégrité de cette dernière. Elle est maintenant devenue le pilier d'une stratégie de maintenance préventive conditionnelle.

La première action pour réussir est donc de déterminer, à partir de l'inventaire du parc à maintenir, la criticité de chacun des équipements. Par défauts, c'est-à-dire par l'importance supposée de la perturbation générée par la défaillance intempestive d'un équipement, suivant un critère de sécurité d'abord, puis économique : il y aura arrêt de production ou non. Il faut ensuite «proportionnaliser» l'effort de prise en charge (documentation technique y comprise » à cet indice de criticité.

Il appartient ensuite au service de préparer et de réaliser des actions:

- en temps réel : surveillance du fonctionnement, traitement d'alarmes,
- à court terme : propreté, inspections et actions correctives (dépannages),
- à moyen terme : actions préventives révisions, actions externalisées, améliorations et modernisations,
- à long terme: grands arrêts, participation aux « travaux neufs » et à la caractérisation des nouveaux équipements

On distingue fondamentalement deux types de surveillance:

- ◆ Surveillance On-line
- ◆ Surveillance off-line

D'après le projet de norme CEN, « la surveillance peut être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue. » [15].

Donc la question qu'on va se poser est la suivante: L'équipement doit-il être suivi de manière périodique ou continue? Pour certaines méthodes, la question ne se pose pas.

En thermographie infrarouge ou en analyse d'huiles, par exemple, la surveillance est nécessairement périodique. Mais il n'en est pas de même pour l'analyse vibratoire. Dans ce cas, c'est à l'industriel d'adapter son mode de surveillance à son besoin et au type de machines qu'il doit suivre.

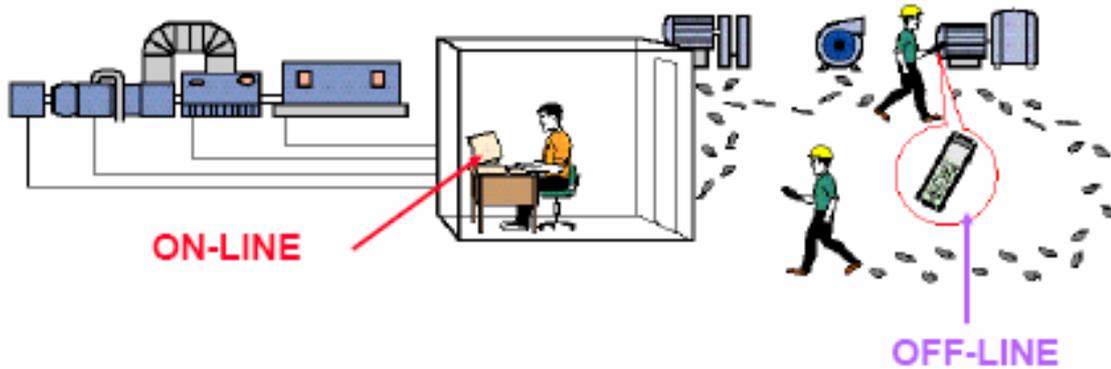


Fig.III.1:Les méthodes de surveillance des machines [28].

III.2.La surveillance On-line

Dans le cas de machines très stratégiques, ou, dont on sait qu'elles connaissent des défaillances assez fréquentes, on choisira des systèmes de surveillance à poste fixe. Le suivi continu se justifie aussi par des raisons de sécurité. Tout dépend de la criticité des machines. Certaines d'entre elles (des turboalternateurs, de gros compresseurs...) doivent pouvoir être automatiquement arrêtées dès que leurs niveaux vibratoires dépassent un certain seuil.

On préfère aussi automatiser la collecte des données pour des raisons d'accessibilité aux machines, ou de pénibilité de la prise de mesures (dans des environnements industriels difficiles). Dans ce cas, les capteurs sont installés à demeure sur les paliers.

Ce type de surveillance est utilisé en permanence sur des machines spécifiques et surveille constamment leurs états, ainsi il joue un rôle important dans l'efficacité de la conduite de l'entreprise. La surveillance On-line est utilisée essentiellement pour pouvoir donner l'alerte immédiate en cas de changement soudain de l'état des machines, déclenchant ainsi l'alerte ou produisant des signaux d'alarmes dans la salle de contrôle. Pour que des mesures appropriées puissent être prises avant la catastrophe [23].

Les premières qualités exigées de tous les systèmes de surveillance permanente sont : une bonne fiabilité, une stabilité à long terme, une insensibilité à un environnement défavorable et aux régularités pouvant provoquer de fausses alarmes. Une conception mécanique robuste capable d'assurer un bon fonctionnement dans un environnement humide, poussiéreux et inhospitalier tel que défini par les normes, ont permis de satisfaire à ces exigences du matériel spécialement « renforcé » (accéléromètres, câbles, boites de jonction...) pouvant aussi fonctionner à haute température, est disponible pour ces applications.

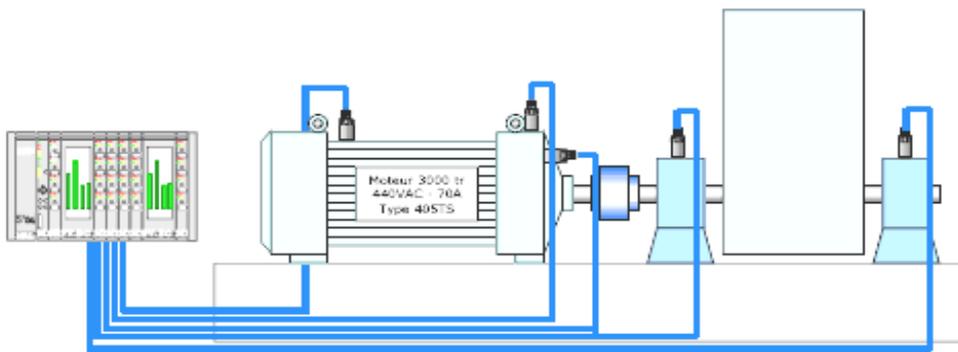


Fig. III.2: la surveillance On-line [28].

III.3.La surveillance off-line

Dans ce suivi, la mesure telle que constatée durant mes observations de terrain et au cours de mon stage est effectuée à **échéance programmée** (Fig.III.5), par un opérateur équipé d'un collecteur de données portable de plus en plus fréquemment informatisé, exemple le VIBSCANNER (Société Cimenterie Hamma Bouziane-SCHB), ainsi que le MOVIOLOG2 (Société de Maintenance des Equipements de l'est -SME). Le suivi périodique permet à un opérateur de suivre les indicateurs désirés d'un grand nombre de machines pour un faible coût, puisque l'investissement en capteurs est réduit (un seul capteur portable est généralement suffisant).

A l'inverse du suivi continu, on utilise un suivi périodique pour des machines qui tombent rarement en panne, pour des dégradations qui n'évoluent pas vite, et pour les cas où l'on pense qu'un contrôle tous les mois, ou tous les deux mois, suffira. Cela suppose donc que l'on ait fait, dès le départ, une analyse de criticité des défauts. Reste ensuite à adapter la fréquence

des contrôles au type de machine et au budget que l'on peut y consacrer. Car tout est une question d'équilibre entre les risques potentiels et le coût du contrôle. En général, il y a toujours plus de risques lors de la mise en route d'une machine. Il est donc conseillé de faire des contrôles assez rapprochés au début, puis de continuer avec des contrôles plus espacés. Ensuite, si l'on voit une dégradation, il faut à nouveau rapprocher les contrôles.

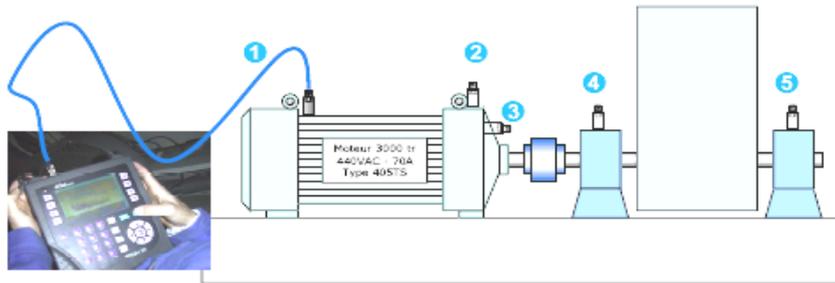


Fig. III.3: la surveillance Off-line [28].

Une fois que l'on a déterminé les machines à surveiller et le suivi qu'elles nécessitent, il ne reste qu'à initialiser la surveillance sur site. Machine par machine, il faut alors choisir où l'on pose les capteurs (le plus simple étant de fixer un accéléromètre par palier), déterminer les paramètres que l'on souhaite suivre, et fixer des seuils de référence, cela permet de déterminer un niveau d'usure "normal" et de réaliser des diagnostics plus précis par la suite. Il faut aussi prendre en compte toute la cinématique de la machine (tel moteur tourne à telle vitesse, il est couplé à tel réducteur, qui lui-même à tel roulement, etc.).

Une fois que le système de surveillance est installé, on peut enfin en optimiser le suivi (en améliorant le paramétrage, la définition des fréquences de contrôle...), ou même l'étendre à d'autres équipements [23].

III.4.Choix de la périodicité du suivi

Les questions déterministes sur le choix de la périodicité sont résumées sur la (Fig.III.5).

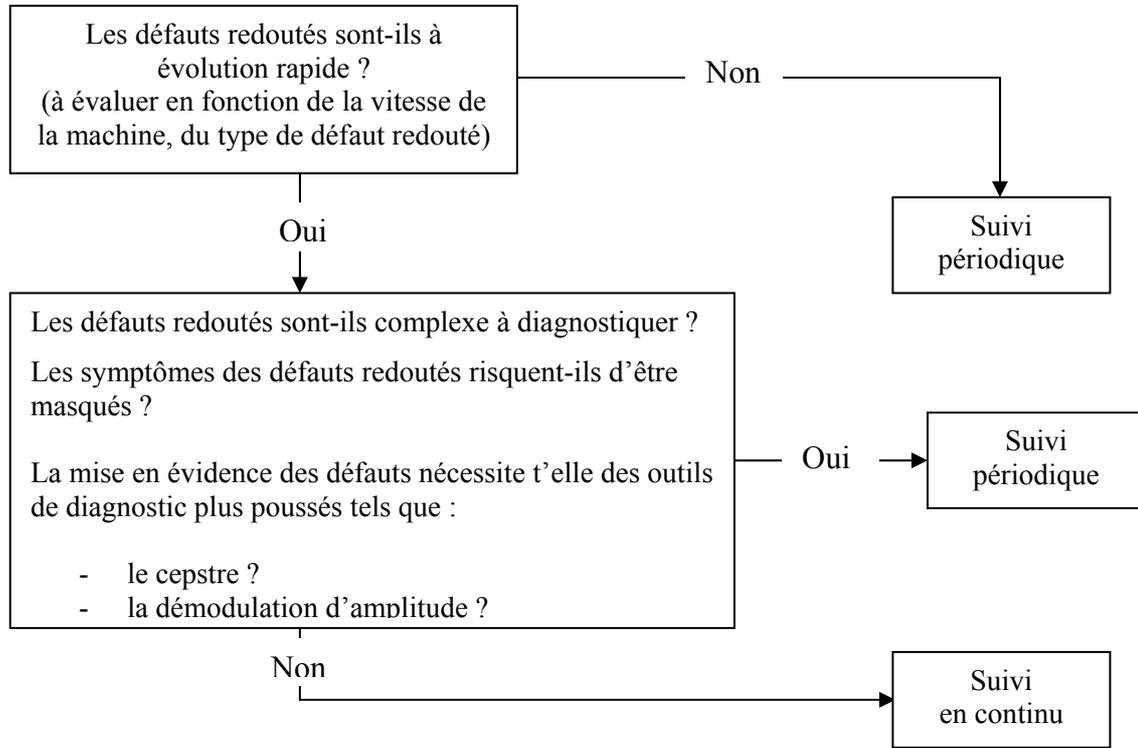


Fig.III.5: choix de la périodicité du suivi [29].

III.5.Investissement mise en œuvre des deux types de surveillance.

On-line: Coûts d'investissement élevés et Coûts de mise en œuvre faibles.

Off-line: Coûts d'investissement faibles et Coûts de mise en œuvre élevés.

	Investissement Initial	Coût de mise en œuvre	Adaptation aux variations	Accès à tous les points	Diagnostic On-line	Fermeture Automatique
Off-line	Faible	Fort				
On-line	Fort	Faible	√	√	√	√

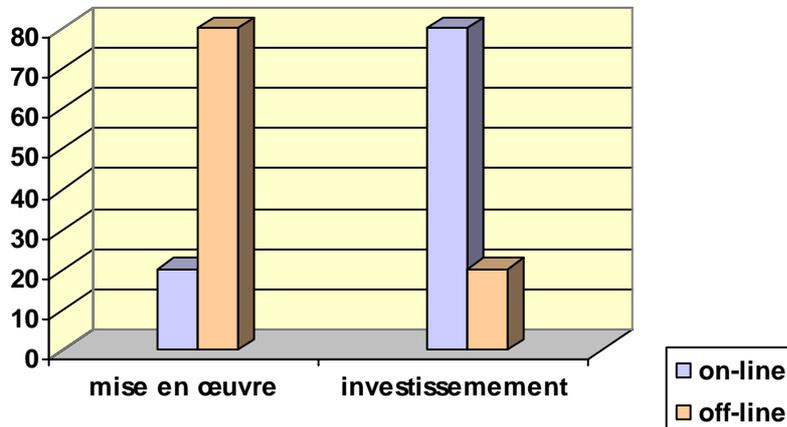


Fig. III.4: investissement et mise en œuvre des deux types de suivi. [28]

III.6.Système de surveillance SCV On-line

III.6.1.Introduction

Les préoccupations majeures actuelles de nos entreprises industrielles, quant à leur système de production, concernent principalement l'augmentation de sa disponibilité instantanée, de sa disponibilité moyenne, de sa maintenabilité, de la sécurité opérationnelle et de la qualité, et la diminution des coûts globaux d'exploitation. Ces besoins justifient la mise en œuvre d'une stratégie de maintenance conditionnelle dont l'objectif est d'anticiper la défaillance par un suivi continu de la dégradation, par le biais d'un système de contrôle en ligne qui aide l'opérateur à prendre la bonne décision à partir des sons, des températures ou des vibrations de la machine, en automatisant les opérations de routine, et en simplifiant l'utilisation. La conception détaillée de ce système de contrôle et d'acquisition est présentée dans ce chapitre.

III.6.2.Description du système de surveillance

Le logiciel OMNITREND introduit une nouvelle conception de la maintenance prédictive en automatisant les opérations de routine afin d'améliorer les vitesses de traitement et de simplifier l'utilisation. Son éventail d'outils d'analyse et de diagnostic vibratoire est de plus en plus large, il permet de réduire considérablement les temps de création de base de données. De plus les temps de gestion du système seront réduits et l'efficacité de la maintenance sera accrue. OMNITREND est compatible à l'environnement WINDOWS 98, 2000, XP, NT et en utilise toutes les fonctions graphiques, ce qui lui confère une grande convivialité.

De plus, il permet le traitement des données de tous les collecteurs de données et analyseurs de db PRUFTECHNIK soient le VIBROSCANNER et le VIBXPERT. Ce même logiciel est également adapté aux unités d'acquisition On-line de type VIBROWEB. Des diagrammes de mimique permettent alors de visualiser en temps réel la sévérité vibratoire ainsi que des températures et vitesses de l'état du parc machines.

Ce logiciel permet en particulier de :

- Programmer une ronde pour parc de machine, le logiciel permet la collecte et l'analyse de données vibratoires issues du système de surveillance mais aussi d'un collecteur portatif. La solution proposée permet ainsi de continuer à collecter périodiquement des données sur les équipements non surveillés en continu.
- Journal de chaque machine, répertoriant tous les changements d'état, en représentant tous les points de mesures sur le plan d'un parc de machine.
- Définir et surveiller les niveaux d'alarme
- Mémorisation cyclique des valeurs de vibration, température et vitesse,
- Télécharger les mesures faites au moyen des collecteurs / analyseurs
- Tracer des courbes de tendance et des spectres.
- Comparer les caractéristiques entre divers points de mesure
- gérer les rondes de mesure, permet d'archiver les données, de les analyser et en faire des rapports de mesures.

Grâce à l'afficheur du SCV, quotidiennement, une simple fenêtre permet de visionner à l'écran la liste des machines, le changement du collecteur de données, les contrôles d'alarmes et l'impression de rapports d'exception, le système focalise votre attention sur l'essentiel – les machines en alarmes.

Trois seuils d'alarme peuvent être programmés pour chaque point de mesure. Des valeurs par défaut recommandées dans les normes ISO, peuvent être sélectionnées automatiquement [annexe.2]. En affichant clairement les conditions d'alarme et les changements en couleur rouge. L'arborescence du parc des machines permet de localiser et visualiser aisément le point qui pose problème.

Le programme est structuré en deux niveaux selon le type d'utilisateur : le mode tendance prévu pour l'usage général et le mode analyse spectrale pour les spécialistes. Les courbes de

tendances permettent une prédiction par interpolation des valeurs globales par l'observation de la croissance des valeurs, voir (Fig. IV.9 et Fig. IV.10).

Chaque unité **VIBROWEB** permet de générer des alarmes par des sorties relais. Elles sont de trois types :

- « **OK** » : indique l'état des capteurs de surveillance et des lignes de transmission.
- « **Alerte** » : lorsque le niveau d'alerte est atteint, une alarme sonore ou visuelle est enclenchée.
- « **Danger** » : lorsque le niveau de danger est atteint, un déclenchement de l'arrêt de la machine peut être commandé.

Chaque unité est actuellement équipée d'un seul relais : il s'agit du relais OK commun pour indiquer un problème de ligne de transmission, de capteur ou d'alimentation défectueuse (relais normalement excité). Chaque unité peut être équipée de 4 relais additionnels librement programmables pour des extensions futures.

Le collecteur de données et analyseur VIBSCANNER permet de surveiller les machines auxiliaires, d'effectuer des équilibrages de machines et de valider le fonctionnement du système On-line par comparaison. Il utilise le même logiciel d'analyse **OMNITREND** que le système On-line.

III.6.3. Capteurs et accessoires du système SCV (OMNITREND)[30]

III.6.3.1. Mesure de vibration :

Chaque palier, moteur ou réducteur, est équipé d'un accéléromètre piézo-électrique avec électronique intégrée supportant une température de 140°C.

L'accéléromètre A 305 fournit un signal de 100 mV/g pouvant être transmis sur une longue distance sans atténuation. Sa plage de fréquence est très étendue, soit de 0.8 Hz à 12000 Hz (+/-3dB). Le capteur est alimenté par un courant constant à 4 mA.

Le capteur est équipé d'un connecteur à vis étanche. Un câble protégé mécaniquement par une tresse en acier inoxydable relie le capteur à la boîte de jonction.

Tâches de mesure:

- vibration globale en mm / s RMS, 2 à 1000 Hz, valeur moyenne sur 2 mesures.
- Pleine échelle : 25 mm/s,
- alarmes par défaut: Alerte 15 mm/s, Danger 20 mm/s.

- analyse spectrale de 0 à 800 Hz, 1600 lignes, en mm/s, valeur moyenne sur 2 mesures.
- analyse temporelle sur 1s, signal brut en accélération, $f_c = 1000$ Hz, $f_e = 9600$ Hz

III.6.3.2. Mesure de température de surface [30]

Le capteur proposé est une thermo -résistance Pt1000 intégrée dans un petit boîtier métallique à monter en surface de la machine. La base en cuivre du boîtier assure une meilleure conduction thermique. L'échelle de mesure est définie de 0 à 100°C.

- La mesure de température, avec valeur moyenne sur 2 mesures.
- Pleine échelle: 120°C,
- Alarmes par défaut: alerte 60°C, danger 80°C.

III.6.3.3. Mesure de vitesse et référence de phase [30]

Quatre machines à vitesse variable comportent une mesure de vitesse et de référence de phase. La chaîne de mesure comporte un capteur avec électronique intégrée supportant une température ambiante de -25 à 85°C.

Un câble protégé mécaniquement par un tube flexible en acier inoxydable relie le capteur à l'unité d'acquisition VIBROWEB.

Le capteur proposé pour la mesure de vitesse DSF 1210, pleine échelle 1500 tr/min

Aucune alarme par défaut.

III.6.3.4. Boîtes de jonction [30]

Pour chaque machine, le câble provenant des accéléromètres, des capteurs de température et de vitesse, est relié une à boîte de jonction. Les signaux sont ensuite acheminés vers les unités **VIBROWEB** par l'intermédiaire d'un câble blindé multi-conducteurs.

Le PC en salle de commande est un PC de visualisation avec en particulier:

En cas d'alarme vibration ou température, des alarmes acoustiques ainsi que des messages sont générés. Ceux-ci doivent être quittancés par les opérateurs de service.

Lorsque le problème est résolu, les alarmes peuvent être remises à zéro par les opérateurs, le PC est enclenché en permanence.

III.7. Fréquence de mesure et d'enregistrement des valeurs globales, et des spectres

Pour une unité VIBROWEB complètement utilisée (32 canaux dont 16 vibrations et 16 températures), le cycle de mesure est de 2 minutes, Pour, une unité qui n'est utilisée qu'à moitié, le cycle de mesure est de 1 minute.

Si la réduction des données est enclenchée, une nouvelle valeur pour une, variation supérieure à 0,2 mm/s pour la vibration, 0.2°C pour la température et 2 RPM pour la vitesse, et 1 spectre est fourni par semaine, ou après une alarme

III.8. Configuration de la base de données d'après l'intervention du fournisseur

Toutes les informations sont enregistrées dans la base de données de OMNITREND, L'arborescence de ces données représente la structure hiérarchique de la base de données de OMNITREND et indique l'organisation des points de mesure du parc machines, ainsi que les tâches de mesures à exécuter.

Pour faciliter le paramétrage des points de mesure et améliorer sa présentation, la base de données est divisée en 6 niveaux différents. Ces niveaux représentent les principales composantes d'un parc machines et se paramètrent individuellement.

La fenêtre Manager machine présente un extrait caractéristique de la base de données, avec ses 6 niveaux :

1. **Parc machines** : c'est le niveau le plus haut ; il correspond à l'installation (ou aux installations) surveillée (par exemple, Hamma Bouziane).
2. **Zone** : secteur de l'installation où se trouvent les trains de machines (par exemple, zone four).
3. **Train de machines** : ensemble constitué d'une machine motrice et d'une machine réceptrice (par exemple, ventilateur final).
4. **Machine** : unité vibratoire (par exemple, moteur).
5. **Point de mesure** : emplacement du capteur sur la machine (par exemple, côté moteur).
6. **Tâche de mesure** : paramètre de mesure avec valeurs d'alarme et type de capteur, voir (Fig.II.7).

OMNITREND dispose de deux fenêtres principales :

- **Manager machine** pour la gestion des éléments de la base de données

○ **Visualisation des mesures** pour l'affichage et l'évaluation des résultats de mesure

OMNITREND vous fournit en plus, toute une série de programmes d'éditeurs et d'éditeurs utiles lorsque vous utilisez le logiciel.

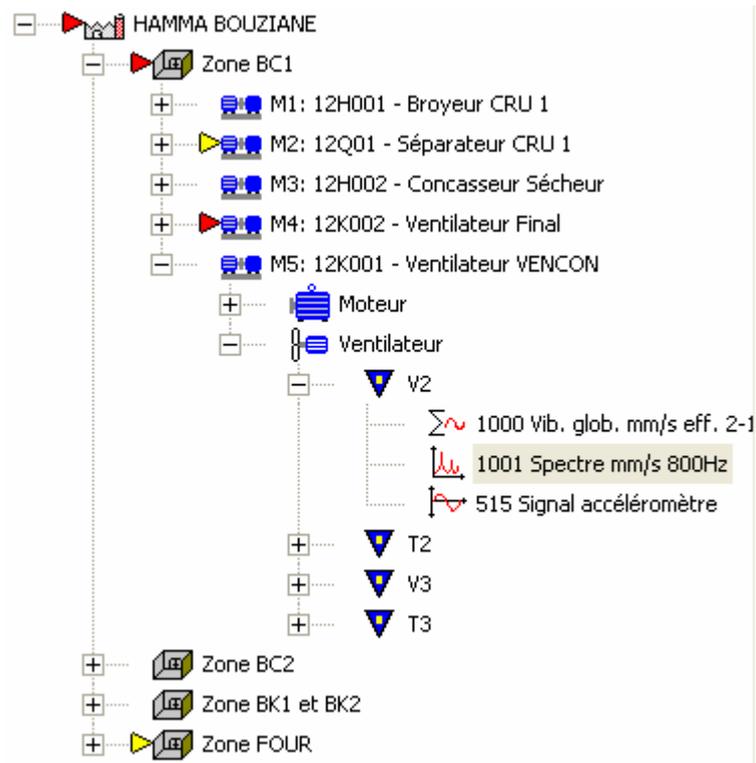


Fig.III.7: La représentation de la structure hiérarchique de la base de données

III.9. Point de mesure

Le nombre de point de mesure retenue pour représenter, et suivre l'évolution de l'état vibratoire de l'installation, est un facteur essentiel pour la fiabilité de la surveillance.

Les machines ont été numérotées de 1 à 15 (Tab.II.1). Chaque point est équipé d'un capteur de vibration et d'un capteur de température. Sur les moteurs de petite puissance et sur les réducteurs, on a placé un seul capteur de vibration et de température. L'endroit le plus approprié devra être déterminé lors de l'installation. Sur les ventilateurs, la mesure de vibration et de température est faite sur un seul palier, le plus proche et donc le plus sollicité du ventilateur. Les machines 5, 9,10 et 11, à vitesse variable, sont équipées en plus d'une mesure de vitesse et de référence de phase permettant l'analyse des vibrations

Nous savons qu'une force est une grandeur vectorielle et qu'un capteur de vibration est un capteur directionnel, donc certains défauts induisant des forces d'excitation directionnelles selon des directions bien définies (radiale ou axiale) et ne seront révélés que si le capteur est correctement positionné.


SYSTEME DE SURVEILLANCE
CIMENTERIE DE HAMMA BOUZIANE


M1: 12H001-Broyeur CRU 1 Etat alarmes  Etat capteurs 	M2: 12Q01-Séparateur CRU 1 Etat alarmes  Etat capteurs 	M3: 12H002-Concasseur Sécheur Etat alarmes  Etat capteurs 
M4: 12K002-Ventil. Final Etat alarmes  Etat capteurs 	M5: 12K001-Ventil. VENCON Etat alarmes  Etat capteurs 	M6: R2M03/M23-Broyeur CRU 2 Etat alarmes  Etat capteurs 
M7: R2S03-Tirage Final Etat alarmes  Etat capteurs 	M8: R2S01-Séparateur CRU 2 Etat alarmes  Etat capteurs 	M9: 14K001-Ventil. Exhaust. G Etat alarmes  Etat capteurs 
M10: 14K002-Ventil. Exhaust. D Etat alarmes  Etat capteurs 	M11: 14F01-Commande Four Etat alarmes  Etat capteurs 	M12: 14K003-Ventil. Exhaure 1 Etat alarmes  Etat capteurs 
M13: 14K004-Ventil. Exhaure 2 Etat alarmes  Etat capteurs 	M14: 16H001-Broyeur Clinker 1 Etat alarmes  Etat capteurs 	M15: 16H002-Broyeur Clinker 2 Etat alarmes  Etat capteurs 

Fig.III.8: Visualisation des 15 machines sous surveillance On-line

À titre d'exemple, dans le cas d'une ligne d'arbres horizontale, l'anisotropie souvent très importante de la raideur radiale d'un palier fait que l'apparition d'un déséquilibre, qui se manifeste par l'apparition d'une force dynamique radiale tournante, se traduira le plus souvent, uniquement, par une amplitude élevée de la composante d'ordre 1 de la fréquence de rotation en direction radiale horizontale, par contre, un desserrage, qui se traduit par l'apparition d'une force dynamique directionnelle, se traduira le plus souvent par une amplitude élevée de cette même composante uniquement en direction radiale verticale. De même, certains défauts notamment de lignage ou d'engrènement se manifestent essentiellement par des efforts axiaux. Il n'est pas rare de rencontrer, suite à des déversements de bagues de roulement, des efforts dynamiques axiaux nettement plus élevés sur le palier «de guidage» que sur le palier «butée». Ces considérations montrent que la fiabilité de la surveillance exige d'effectuer les prises de mesures selon trois directions orthogonales: l'une parallèle à l'axe de rotation et les deux autres radiales [22].

Mais pour des raisons d'optimisation, le choix s'est porté sur la direction radiale la plus sensible, qui correspond à une large gamme de défauts. Après une investigation basée sur une synthèse bibliographique, on a pu justifier le choix décidé par la cimenterie lors de la transaction et l'achat du logiciel avec un nombre de points de mesure limité à une seule direction, pour des raisons essentiellement économiques.

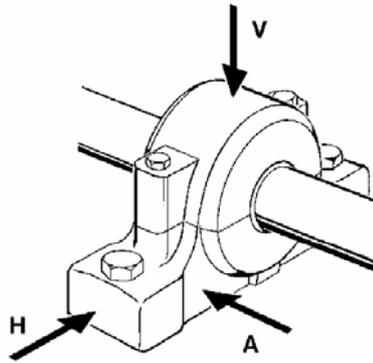


Fig.III.9: représentation des points de mesure des vibrations

III.10.Topographie du site

Les unités d'acquisition VIBROWEB ont 32 canaux. La topographie du site et le nombre important de signaux provenant des différentes machines nous contraint d'utiliser 5 unités d'acquisition. Les signaux sont répartis de la manière suivante :

Sous-station Unité	Machines	Vibrations	Températ.	Vitesse	Total
P12 VIBROWEB 1	1-3(zone BC1)	13	11	0	24
P12 VIBROWEB 2	4, 5 (zone BC1) et 7 (zone BC2)	12	12	1	25
P12.2 VIBROWEB 3	6 et 8 (zone BC2)	15	12	0	27
P16 VIBROWEB 4	14-15 (zone BK1 et BK2)	8	8	0	16
P14 VIBROWEB 5	9-13 (zone FOUR)	16	14	3	33
	Nombre total de points	64	57	4	125

Tableau III.1: la topographie du site.

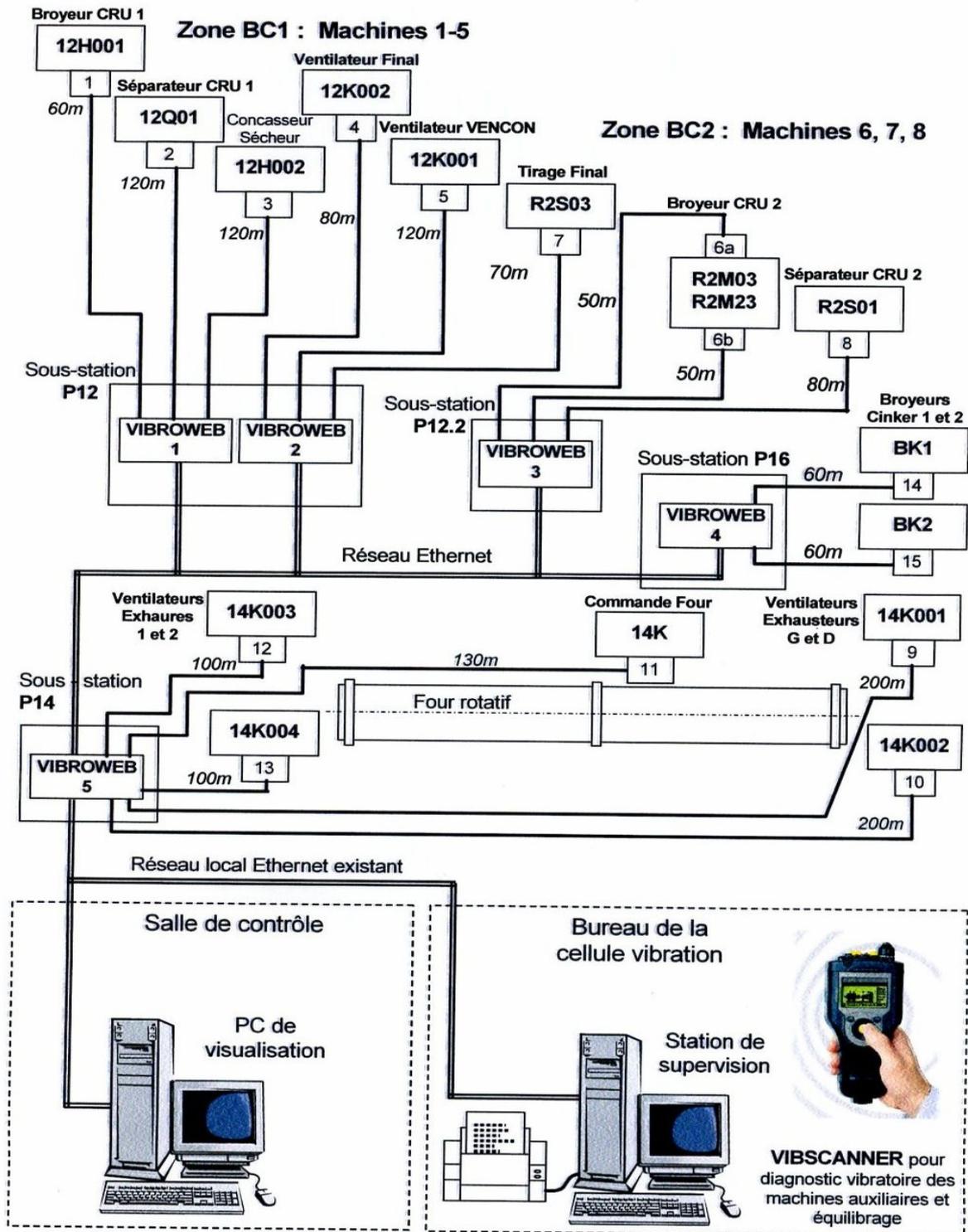


Fig.III.10: La topographie du site.

III.11. Propositions pour optimiser la surveillance On-line.

Les consignes observées ci-dessus, ne sont pas cependant, pratiquées à cause des mesures d'adaptation décidées par les opérateurs techniques de la cimenterie, afin de ne pas nuire au processus de production et de garantir sa continuité ; en fait, les arrêts automatiques prévus sont programmés par le fournisseur, répondent à des seuils d'alarme et de danger relativement exagérés, bien que nominales. Nous proposons, afin de maintenir le consensus entre le maintien de l'option d'arrêt automatique et la périodicité de ces arrêts, de définir et permettre des seuils d'arrêt modérés répondant aux besoins minimum de la sécurité sans pour autant faire obstruction et nuire à la production. Ces seuils de sensibilité doivent être définis afin de tenir compte de l'aléa ci-dessus sans pour cela généraliser la mise en veilleuse de l'option d'arrêt automatique.

Nous avons aussi constaté des insuffisances concernant la bande passante fréquentielle de l'OMNITREND limitée par la fourchette des moyennes fréquences [0- 1000Hz], ce qui limite le champ de surveillance aux défauts concernés par les moyennes fréquences tels que le balourd et le désalignement ; cependant les défauts liés aux hautes fréquences, tels que les roulements, les engrenages... ne peuvent être identifiés par le système de surveillance OMNITREND. Afin de parer à cet inconvénient, nous proposons à défaut d'achat, une option supplémentaire pour les larges bandes fréquentielles, pour compléter le suivi par une démarche de surveillance Off-line que l'on considère indispensable.

Finalement, on peut dire que depuis l'introduction effective de la surveillance On-line, en décembre 2005, un indice d'amélioration est identifié, d'autre part caractérisé par la rupture des charges (coût) supplémentaires causées par les sous-traitances avec les structures du suivi externe tel que la SME. En effet, depuis la mise en place du suivi On-line, utilisant le logiciel OMNITRENDE, la cimenterie s'est vue capable d'assumer totalement la surveillance et le contrôle vibratoire du parc machinerie, avec un seuil relatif de confiance acceptable. De part ce fait, la cimenterie s'est donc nettement distinguée par rapport à d'autres secteurs industriels répartis au sein du territoire national, et elle a pu se considérer comme précurseur en tant que modèle dans la contribution et la modernité de la gestion technique industrielle, tout en s'alignant avec les exigences préconisées par les normes internationales de la sécurité et du respect de l'environnement.

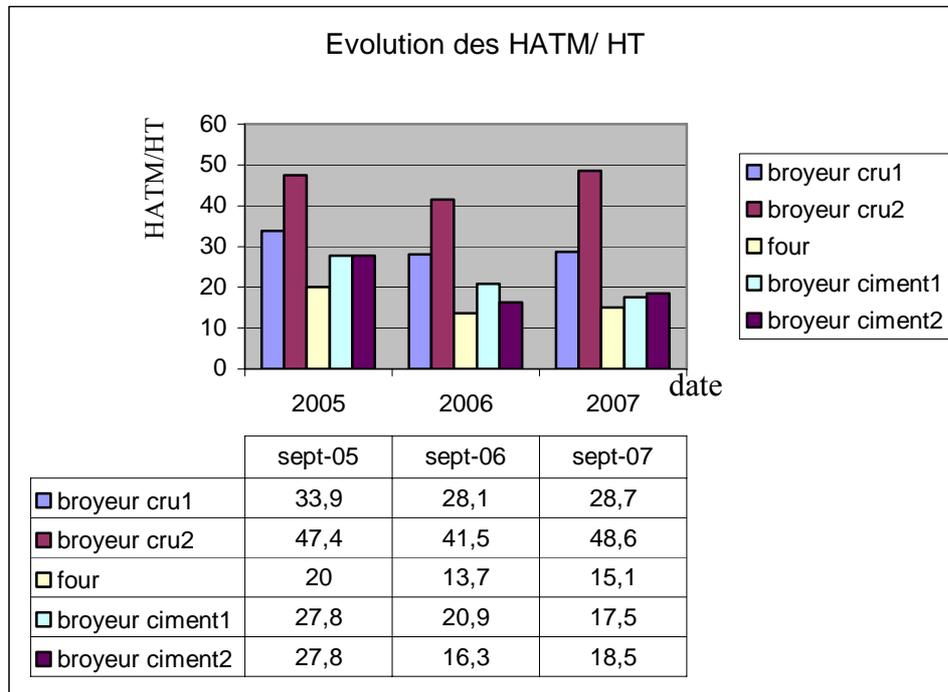


Tableau III.2 : évolution de HATM/ HT

Le tableau ci-dessus, peut constituer un critère relatif d'appréciation de l'indice révélateur de cette évolution durant les trois dernières années, basée sur les colonnes du suivi de l'augmentation du nombre d'heures de marche, exprimée sous forme de "ratio=HM/HT", ou bien par la diminution du nombre d'heures d'arrêt totale de maintenance, exprimé par des colonnes correspondantes au rapport "ratio=HATM/HT".

En conclusion, nous soulignons qu'il n'est jamais suffisant de dire, afin de mieux garantir une bonne démarche du suivi de maintenance, qu'il faudrait pouvoir optimiser tous les moyens disponibles, c'est-à-dire, garantir **une surveillance mixte** qui tient compte des insuffisances du suivi On-line qui doit être complétée par la tâche Off-line. En effet nous avons constaté que la surveillance On-line utilisant le système SCV, d'une part subit une base de donnée insuffisante de part le fait des options disponibles, d'autre part l'exploitation même du système SCV, qui reste sous exploitée et limitée seulement à 15 machines dites stratégiques, qui cependant ne constituent d'après les déclarations du service de maintenance en fait que le 40% des machines de même importance. Nous préconisons alors de remédier à cette insuffisance en profitant des avantages et des améliorations constatées durant les 2 dernières années de service du système SCV.

III.12.Exemples de mise en évidence de l'apport de la surveillance continue

Cas du Broyeur BK

A titre indicatif on peut citer le broyeur BK, dont le suivi vibratoire a permis d'intervenir presque à temps et parer à la détérioration catastrophique du réducteur, conséquence de la défaillance d'un roulement fissuré, ce qui aurait entraîné l'arrêt du broyeur, avec de graves conséquences économiques reliées à :

- l'arrêt de la production, estimée à 1500 t/jrs (1^{1/2} milliard centime)
- les délais de livraison par expérience peuvent aller jusqu'à 2ans, essentiellement du fait de la spécificité reliée à la grandeur et l'importance des pièces. A titre d'exemple, la livraison d'un grand roulement de réducteur est d'environ une année.
- d'autre part les pièces défaillantes citées précédemment, sont excessivement coûteuses du fait de leurs spécificités, et leurs importances (pièces importées, disponibles seulement sur commandes,...).
- du fait de son rôle stratégique, la défaillance du réducteur, véhicule d'autres préjudices à l'ensemble de la centrale hydraulique.
- La réparation pour la remise en service nécessite des expertises anticipées sur place par des équipes spécialisés, venant d'outre mer. En plus de la mission dévouée à la tâche même de la maintenance.

Cas du broyeur BC

- l'augmentation excessive du NGvit, qui dépasse le seuil de danger, a signalé l'existence d'une anomalie, qui a motivé un diagnostic poussé, moyennant une analyse spectrale, et a abouti à la détection précoce d'un défaut de fixation, apparent au droit des harmoniques supérieures de la fréquence de rotation.
 - Par suite une intervention a pu être programmée à terme, afin de remédier au problème vibratoire préjudiciable survenu, causé par le desserrage des boulons, ainsi que les corrections de jeux déjà préconisées prévues.
- Il n'est pas sans dire que les coûts d'amortissement réalisés s'inscrivent dans le même ordre économique que précédemment (voir le cas BK).

III.13.Conclusion

Le logiciel OMNITREND introduit une nouvelle conception de la maintenance prévisionnelle en automatisant les opérations de routine afin d'améliorer les vitesses de traitement et de simplifier l'utilisation. Son éventail d'outils d'analyse et de diagnostic vibratoire est de plus large grâce à l'utilisation de modèles, il permet de réduire considérablement les temps de création de base de données.

De plus, les temps de gestion du système seront réduits et l'efficacité de la maintenance sera accrue. Il est clair que, indépendamment des performances des indicateurs de surveillance retenues, seule la surveillance permanente est susceptible de détecter l'apparition brutale de défauts à évolution rapide (grippage d'un roulement, fouettement ou frottement de l'arbre dans un palier...) ou l'existence de défauts révélée seulement pour des conditions d'exploitation particulières ou dans des phases transitoires.

Chapitre IV

Etat de l'art des analyses vibratoires sur machines tournantes

Chapitre IV : Etat de l'art des analyses vibratoires sur machines tournantes

IV.1.Introduction

Le fonctionnement des machines engendre des efforts (efforts tournants, turbulence, chocs, instabilité) qui seront souvent la cause des défaillances ultérieures.

Pour établir un diagnostic, il faut s'appuyer sur le fait qu'une machine émet vers l'extérieur de nombreux signaux qui sont symptomatiques de son fonctionnement, tels que la chaleur dégagée, la puissance absorbée, le bruit, les vibrations, etc.

les vibrations dépendant directement des forces générées par les différents éléments internes en mouvements, pondérées par la fonction de transfert des liaisons (roulements, film d'huile, film d'air, boulons, supports élastiques, ressorts, etc.), présentent des grands avantages en raison de la richesse des informations qu'elles véhiculent, de leur transmission quasi-instantanée et de leur rapport direct avec les mouvements de la machine, ainsi les vibrations occupent une place privilégiée parmi les paramètres à prendre en considération pour assurer une surveillance efficace du bon état de fonctionnement des machines tournantes, éléments essentiels, au cœur des process de fabrication. C'est pourquoi, la plupart des méthodes modernes de maintenance des machines font appel à l'analyse du comportement vibratoire, qui s'est aujourd'hui très fortement répandue dans l'industrie en y trouvant sa place au sein des stratégies de maintenance conditionnelle.

Les mesures réalisées sur les machines en fonctionnement sont faciles à mettre en œuvre et la technique permet une détection précoce de la plupart des défauts rencontrés sur les machines de production. De nombreuses anomalies telles que le déséquilibre des lignes d'arbres, le mauvais lignage des machines accouplées, la dégradation des accouplements, les jeux, l'usure des roulements et même les défauts électriques peuvent être détectés suffisamment tôt pour planifier une intervention avant la panne.

L'analyse des vibrations joue un rôle essentiel non seulement dans le diagnostic de l'état des machines à des fins de maintenance, mais aussi dans le cadre de la recette d'un équipement neuf ou venant de faire l'objet d'une révision :

- Pour un équipement neuf, l'analyse vibratoire permet la détection d'anomalie ou défauts de montage.

- Pour un équipement venant de faire l'objet d'une remise en état, elle permet de vérifier si cette opération a bien corrigé les anomalies vibratoires identifiées ayant conduit à la prise de décision d'arrêt.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents aspects et définitions liées aux vibrations des machines tournantes.

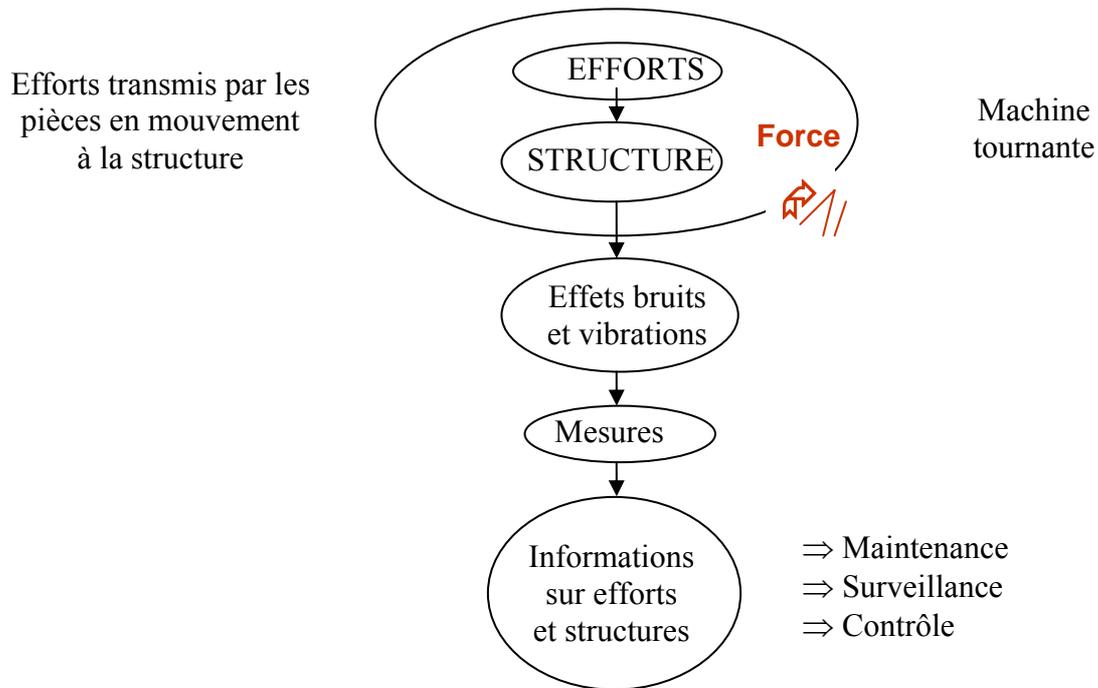


Fig. IV.1: Principe de la surveillance vibratoire [24].

IV.2. Notions fondamentales

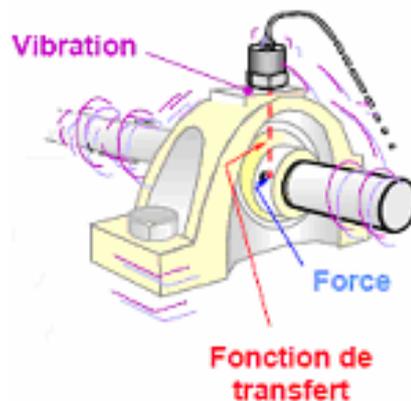


Fig. IV.2: Mesure d'une vibration.

IV.2.1. Définition d'une vibration

Selon la norme NFE 90-001: Une vibration est une variation avec le temps d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique lorsque la grandeur est alternativement plus grande ou plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence [24].

Le nombre de cycles complets du mouvement dans une période de temps d'une seconde est appelé fréquence et est mesuré en hertz (Hz). Le mouvement peut consister en une composante unique se produisant à une fréquence unique, ou bien il peut consister en plusieurs composantes se produisant à des fréquences différentes, simultanément.

En pratique, les signaux vibratoires sont composés d'une grande quantité de fréquences apparaissant simultanément au point que l'on ne puisse juger immédiatement au vu de la caractéristique amplitude-temps du nombre de composantes simultanées et à quelle fréquence elles se produisent. Ces composantes peuvent être mises en évidence par le tracé de la caractéristique des vibrations amplitude-fréquence, une technique qui peut être considérée comme la pierre angulaire du diagnostic de mesures des vibrations.

Les phénomènes vibratoires sont des phénomènes périodiques ou apériodiques plus ou moins complexes, qui dépendent directement des forces générées par les différents éléments internes en mouvement :

- ◆ Forces impulsionnelles (chocs)
- ◆ Forces transitoires (variations de charge)
- ◆ Forces périodiques (balourd)
- ◆ Forces aléatoires (frottements)

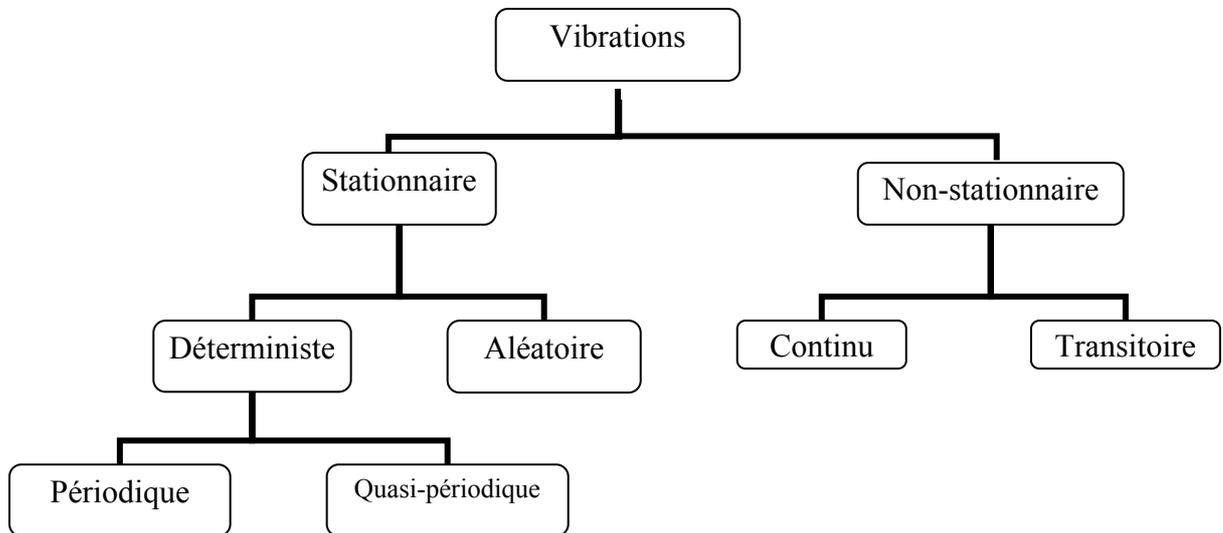
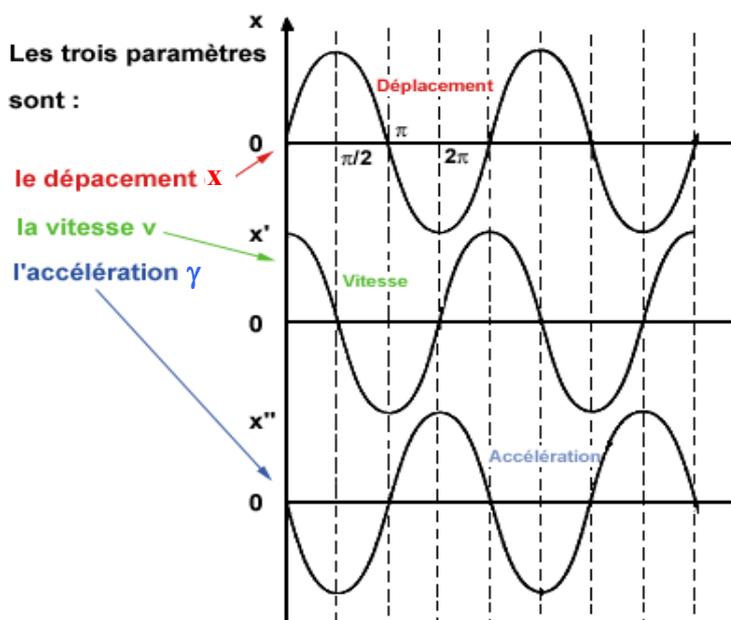


Fig. IV.3: Représentation des types de vibration.



$$X(t) = A \sin (2\pi f t)$$

$$\text{Alors : } v(t) = \frac{dX}{dt}$$

$$= 2\pi f A \sin (2\pi f t + \pi/2)$$

$$\text{et } \gamma(t) = \frac{d^2X}{dt^2}$$

$$= (2\pi f)^2 A \sin (2\pi f t \pm \pi)$$

Fig. IV.4: Représentation du mouvement d'un système simple.

Une vibration se caractérise principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature.

$$X(t) = A \sin (\omega t + \Phi) \quad (\text{IV.1})$$

Φ : la phase

A : l'amplitude appelée parfois le module

$$\omega = \text{pulsation (rad/s)} = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{IV.2})$$

T= période (s)

f = fréquence exprimée en hertz (Hz),

$$1 \text{ Hz} = \frac{1\text{CPM}}{60} = \frac{1\text{RPM}}{60} \quad (\text{IV.3})$$

Comme tout mouvement, une vibration est caractérisée par l'un des trois paramètres physiques: le déplacement x , la vitesse v , l'accélération γ , qui sont reliés par des relations mathématiques, et qui ont une fréquence identique (Fig.IV.4).

On peut donc, déduire des relations simples entre ces trois grandeurs, en faisant intervenir la fréquence.

$$x = \frac{v}{2\pi f} = \frac{\gamma}{(2\pi f)^2} \quad (\text{IV.4})$$

$$v = \frac{\gamma}{2\pi f} = 2\pi f \cdot x \quad (\text{IV.5})$$

$$\gamma = 2\pi f v = (2\pi f)^2 \cdot x \quad (\text{IV.6})$$

Généralement, le déplacement s'exprime en micromètre (μm), la vitesse en mm/seconde et l'accélération en g, en reprenant les relations ci-dessus, on obtient alors:

$$x (\mu\text{m}) = \frac{253\,300 \gamma(\text{g})}{f^2} = \frac{159 v (\text{mm/s})}{f} \quad (\text{IV.7})$$

$$v (\text{mm/s}) = \frac{1590 \gamma(\text{g})}{f} \quad (\text{IV.8})$$

$$\gamma (\text{g}) = \frac{f v (\text{mm/s})}{1590} \quad (\text{IV.9})$$

IV.2.2. Amplitudes

L'amplitude d'une onde est la valeur de ses écarts au point d'équilibre. On peut définir :

- l'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelée amplitude crête (V_c) ou niveau crête ;
- l'amplitude double, aussi appelée l'amplitude crête à crête (V_{cc}) (peak to peak) ou niveau crête à crête;
- l'amplitude efficace (V_{eff}), aussi appelée RMS (root mean square) ou niveau efficace [31-29-32] (Voir Fig.IV.5).

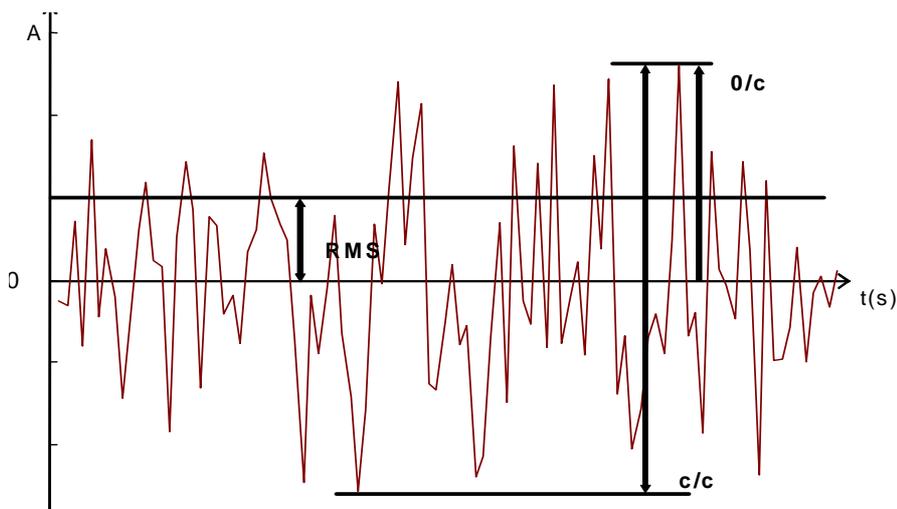


Fig. IV.5: Les amplitudes d'un signal vibratoire quelconque [32].

La valeur RMS ou valeur efficace, contient toute l'énergie du signal c'est-à-dire toute l'information pertinente mais aussi le bruit de fond [33].

La valeur RMS est donnée par la formule suivante:

$$V_{RMS}(X_{eff}) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (IV.10)$$

$$\text{et } V_{RMS}(X_{eff}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n)]^2} \quad (IV.11)$$

Equations représentant le RMS d'un signal continu et d'un signal discret

Pour un signal sinusoïdal, on peut établir la relation $V_{eff} = \frac{v_c}{\sqrt{2}} = 0.707A_c$, cette relation devient fausse, dès qu'on est devant un signal quelconque aléatoire. [32-34]

Ainsi les mesures d'amplitudes sont généralement présent comme suis :

Indicateur de surveillance	Amplitude généralement mesurée en
Déplacement x	Valeur/crête (V_C) Valeur crête à crête (V_{CC})
Vitesse v	Valeur crête Valeur efficace (V_{eff})
Accélération γ	Valeur efficace (V_{eff})

Tableau IV.1: L'indicateur de surveillance et l'amplitude correspondante [29]

IV.2.3. Nature d'une vibration

La (Fig.IV.6) illustre la représentation temporelle des vibrations en fonction de leur nature. Voir plus de détails [29- 19-31]

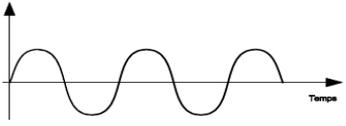
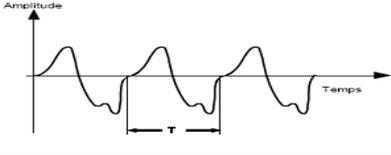
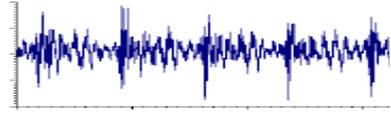
Nature des vibrations	Représentation temporelle des vibrations	Causes possible
A : Périodique de type sinusoïdal simple		balourd
B : Périodique de type sinusoïdal complexe		Engrènement
C : Périodique de type impulsif		Ecaillage des roulements
D : Aléatoire de type impulsif		Défauts de lubrification sur des roulements cavitation

Fig. IV.6: Nature de la vibration selon les variations de son amplitude en fonction du temps [29].

IV.3. Choix des grandeurs physiques à mesurer

Les relations précédentes mettent en lumière l'importance du choix de la grandeur physique à mesurer pour la surveillance d'une machine tournante. Cette grandeur est appelée paramètre ou indicateur de surveillance

IV.3.1. Domaine de surveillance

- Puisque le déplacement est inversement proportionnel au carré de la fréquence, la mesure en mode déplacement aura pour effet d'atténuer toutes les composantes moyennes et hautes fréquences et d'amplifier les composantes basses fréquences, son utilisation est réservée donc aux très basses fréquences : $F \leq 100$ Hz
- La vitesse est inversement proportionnelle à la fréquence : Plus la fréquence augmente, plus la vitesse diminue : Son utilisation est réservée aux basses fréquences : $F \leq 1000$ Hz.
- L'accélération, représentative des forces dynamiques, ne dépend pas de la fréquence : C'est le paramètre privilégié en analyse vibratoire sur un large domaine de fréquences. $0 \leq F \leq 20000$ Hz [21] (Fig.IV.8)

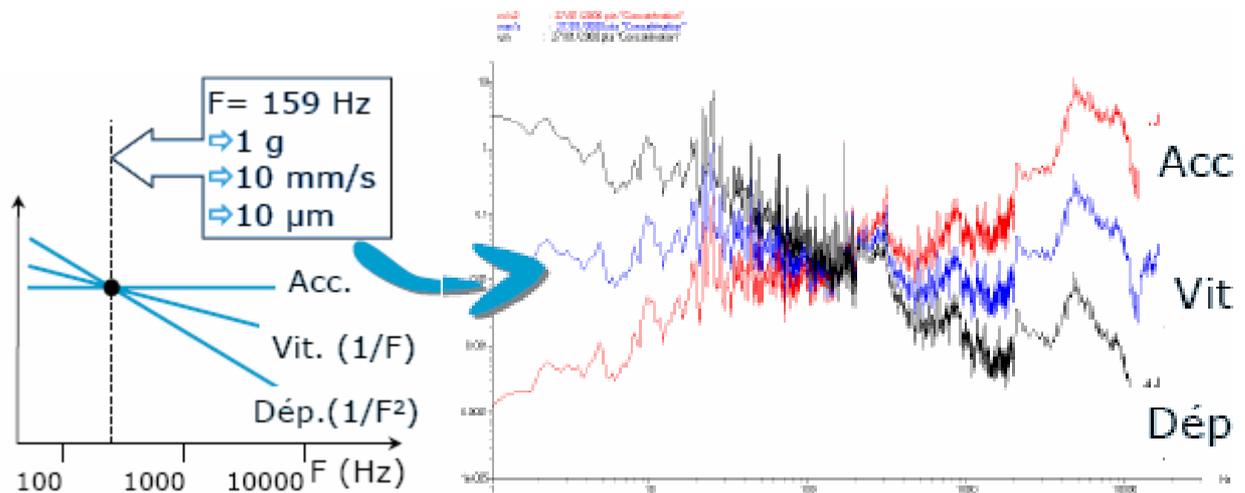


Fig. IV.7: choix des grandeurs physiques à mesurer en fonction de la nature des défauts recherchés [24].

Concrètement cela se traduit par les observations suivantes :

- un phénomène vibratoire induit par un phénomène donné se traduira par un déplacement significatif si sa fréquence est faible. C'est la raison pour laquelle la mesure en mode déplacement n'est généralement utilisée que pour mettre en évidence des phénomènes à basse fréquence 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 des phénomènes dont la fréquence n'est pas trop élevée (passage de pale d'un ventilateur ou d'une pompe, engrènement sur réducteur, défauts de roulements dans le cas d'écaillage localisés,..) et bien évidemment les défauts traditionnels des lignes d'arbres (déséquilibre, désalignement, déformation, instabilité, frottement,...)
- La mesure en mode accélération (directement proportionnelle aux forces dynamiques induisant le mouvement) 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 impulsifs de courte durée, riches en composantes haute fréquence (écaillage de roulement, jeu, cavitation, ...) [29].

Donc, pour rechercher un défaut, on mesure l'amplitude vibratoire en mode déplacement, vitesse ou accélération, selon que, la fréquence de la composante vibratoire prépondérante induite se situe en : basse, moyenne ou haute fréquence.

Types de défauts		Déplacement ($\mu\text{m c/c}$)	Vitesse (mm/s eff)	Accélération (g eff)	chocs
Basses fréquences					
- Balourd - Désalignement - Usure d'accouplement - Desserrage - ...		/	/	—	—
Moyennes fréquences					
- Engrènement défectueux - ...		—	/	/	/
Hautes fréquences					
Roulements	- Usure régulière	—	—	/	—
	- Mauvais graissage	—	—	/	—
	- début d'écaillage	—	—	—	/
	- Marquage important	—	—	/	/
	- Très dégradé	—	/	/	—

Tableau IV.2: Suivi du niveau vibratoire des indicateurs [35]

Le suivi simultané des 3 niveaux globaux : déplacement, vitesse et accélération est un bon indicateur de l'origine du phénomène, malheureusement, il ne permet pas d'établir un diagnostic précis, mais seulement d'orienter les recherches.

IV.4. Indicateurs vibratoires

IV.4.1. Définition

Un indicateur de surveillance est une grandeur vibratoire dérivant des trois grandeurs cinématiques de base caractérisant un mouvement vibratoire (accélération, vitesse, déplacement), qui est sensible à l'apparition ou à l'évolution d'un défaut ou d'un ensemble de défauts. Pour un suivi correct, l'indicateur doit présenter deux qualités essentielles : la simplicité de la prise de mesure et la signification importante de leur contenu.

Il est pure utopie de vouloir croire en l'existence d'un indicateur universel sensible à tous les défauts susceptibles d'affecter le comportement vibratoire d'une machine, dont la sensibilité

serait indépendante de la nature du défaut, et dont la valeur du seuil associé serait elle aussi indépendante de la nature du défaut, du type de machine et de ces conditions de fonctionnement.

Contrairement aux pratiques courantes, la description du comportement vibratoire d'une machine, la surveillance de son évolution, la formulation d'un diagnostic nécessitent de faire appel à de très nombreux indicateurs et critères. Il en existe quatre types [16]:

- indicateurs scalaires,
- indicateurs spectraux,
- indicateurs vectoriels,
- indicateurs temporels.

En fonction de leurs paramètres, ces indicateurs peuvent être regroupés en deux grandes familles :

- les indicateurs scalaires énergétiques,
- les indicateurs typologiques ou comportementaux [36].

Les premiers quantifient l'énergie vibratoire sans relation directe avec les forces dynamiques qui l'induisent. Les seconds quantifient essentiellement les manifestations vibratoires de chaque force et défaut dont la machine est le siège en tenant compte des spécificités dynamiques de chaque machine, de son transfert vibratoire qui est lui aussi spécifique à des interactions avec le procédé [36 -16-29].

IV.4.2. Les indicateurs scalaires

Un indicateur scalaire associe à un signal brut ou ayant fait l'objet d'un traitement préalable (filtrage, démodulation), une grandeur caractéristique de son amplitude (valeur efficace, amplitude crête, taux de modulation...), de sa distribution d'amplitude (facteur de crête, kurtosis) ou de sa composition spectrale (amplitude d'une composante spectrale, valeur efficace d'une famille de composantes, taux d'harmoniques...) [36 -16].

Leur utilisation très répandue s'explique aisément par leur facilité d'utilisation : ils se réduisent à un nombre, se prêtent facilement à l'automatisation de leur gestion (archivage, courbes d'évolution, comparaison à des seuils).

Exemples :

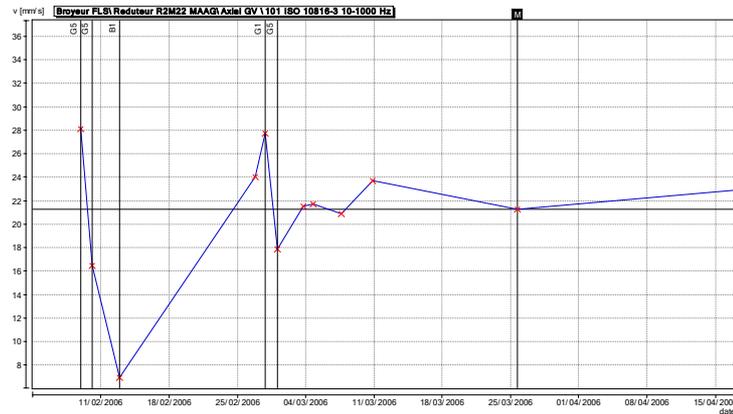


Fig. IV.8: Niveau Global Vitesse [2-1 000] Hz

Définir un indicateur scalaire dans le domaine tempore nécessite de choisir [16]:

- une grandeur cinématique représentative du mouvement vibratoire (accélération, vitesse, déplacement) selon la nature et le type de capteur utilisé (capteur de vibration absolue ou relative, accéléromètre, vélocimètre...)
- une grandeur représentative de l'amplitude du signal (valeur efficace, amplitude crête, facteur de crête, kurtosis...),
- une bande fréquentielle dans laquelle on veut calculer le paramètre retenu,
- une durée d'analyse, afin que le signal pris en considération dans le calcul de la valeur de l'indicateur, soit représentative du mouvement vibratoire de la machine

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

Il est assimilé à l'énergie vibratoire lorsque la grandeur cinématique représentée par le signal est la vitesse vibratoire. Ce terme est également utilisé pour quantifier le déplacement et l'accélération.

IV.4.3. Les indicateurs spectraux

Un indicateur spectral associe à un signal une représentation spectrale de ce dernier (spectre, zoom, cepstre, spectre de fonction de modulation, fonction de transfert...).

Ces indicateurs présentent le grand intérêt d'être sensibles aussi bien aux évolutions de la forme d'un signal qu'à celles de son énergie, et de ce fait, sont insensibles aux effets de masque, à condition que les résolutions d'analyse choisies pour les élaborer soient en adéquation avec les fréquences de répétition des phénomènes recherchés. Ils offrent donc des perspectives extrêmement intéressantes dans le cadre de la surveillance des machines. Ils constituent par ailleurs un progrès considérable dans l'adéquation entre indicateur et défaut et la facilité de leur comparaison graphique par rapport à un état de référence favorise grandement l'interprétation de leurs évolutions [36].

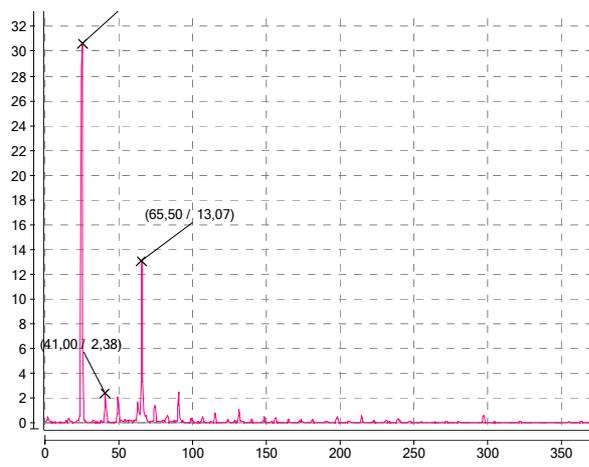


Fig. IV.9: Spectre [2-1 000] Hz

IV.4.4. Incidences du choix d'un indicateur :

Le choix d'un indicateur est loin d'être neutre. Chaque paramètre le définissant a une signification physique propre (accélération, vitesse, déplacement, valeur efficace, valeur crête, bande fréquentielle de définition, temps d'observation...) et correspond à un aspect particulier du comportement vibratoire. De ce fait, ce choix privilégie la détection de l'apparition d'un défaut ou d'une famille de défauts en éludant souvent la détection des autres.

Prenons pour exemple l'indicateur scalaire représentant la valeur efficace de la vitesse vibratoire mesurée dans la bande [10-1000 Hz]. Cet indicateur n'est pas sensible aux défauts

ayant une influence sur le premier ordre de la fréquence de rotation si cette dernière est inférieure à 600 tr/mn ! [36].

IV.4.5. Défauts potentiels des rotors et leurs indicateurs

Le tableau ci-dessous indique les défauts qui apparaissent le plus souvent sur les machines industrielles, ainsi que les indicateurs essentiellement vibratoires qui leurs sont associés.

Type de défaut	Fréquence d'apparition	Indicateur
Balourd	25 %	f_0 , φ , radial
Défaut de lignage	25 %	f_0 , $2f_0$, φ , axial & radial
Défauts de roulement	30%	BCU, HF, enveloppe, facteur de crête, facteur K
Défaut d'engrènement	10%	Zoom, cepstre
Défaut électrique		Zoom + pince ampèremétrique
Résonance de structure		Choc, 3D, ODS (déformée en charge)
Divers	10 %	

Tableau. IV.3: Les défauts potentiels des rotors et leurs indicateurs [37].

V.4.6. Seuil d'un indicateur

Une mesure de vibrations doit être considérée comme relative. En effet, elle n'a aucune signification lorsqu'elle est isolée.

Le concept de seuil associé à un indicateur est un des points clés de la surveillance et de la maintenance conditionnelle ou prévisionnelle. En effet la mesure de vibrations, n'a aucune signification, si elle n'est pas considérée comme relative. Donc tant que la valeur d'un indicateur n'excède pas une valeur prédéfinie ou seuil, l'installation est considérée en bon état. Aucune investigation complémentaire, arrêt pour inspection ou intervention corrective n'est à envisager:

- une valeur trop basse entraîne des alarmes non justifiées,
- une valeur trop élevée rend la détection précoce d'un défaut impossible et une panne peut même se produire sans la moindre alarme préalable.

Dans ces deux situations, la surveillance se trouve discréditée, ce qui rend le choix de la valeur du seuil un acte fondamental.

Le seuil, associé à chaque indicateur, sera déterminé par l'expérience, par référence à une norme ou à la spécification d'un constructeur ou bien, plus généralement, par comparaison avec le niveau qu'avait l'indicateur lorsque la machine était jugée en bon état de fonctionnement [35]. Il faut donc définir des méthodes qui permettront de déterminer des seuils "d'avertissement" et "d'arrêt", avec une bonne probabilité de réussite [16].

Les systèmes de surveillance définissent au moins deux seuils hiérarchisés :

- Le premier seuil dit seuil d'avertissement est également appelé niveau d'alarme. Le dépassement du seuil d'alarme doit systématiquement déclencher une procédure de diagnostic afin de localiser, l'origine exacte de l'anomalie qui a déclenché cette alarme. (Voir annexe 2 et 3)

- Le second seuil dit seuil de danger. Le dépassement du seuil de danger nécessite de procéder à un diagnostic immédiat de l'état de l'installation pour statuer sur l'urgence d'un arrêt et d'une action corrective.

IV.4.6.1. Méthode du relevé global

Les différents niveaux globaux doivent être représentés sur des courbes. Les amplitudes sont reportées sur l'axe vertical, le temps (jours des mesures, voire heures) sur l'axe horizontal. Cette méthode consiste à relever les mesures globales sur une machine lorsqu'elle est réputée fonctionner de manière satisfaisante (rendement, consommations, disponibilité,...). Cet état est dit "de référence". (Fig. IV.9)

Dans la pratique, le seuil d'alarme est généralement fixé à 8 dB (rapport 2,5) au dessus du niveau de référence.

De même, le seuil d'arrêt est généralement fixé à 8 dB (rapport 2,5) au dessus du niveau d'alarme (fig.IV.11).

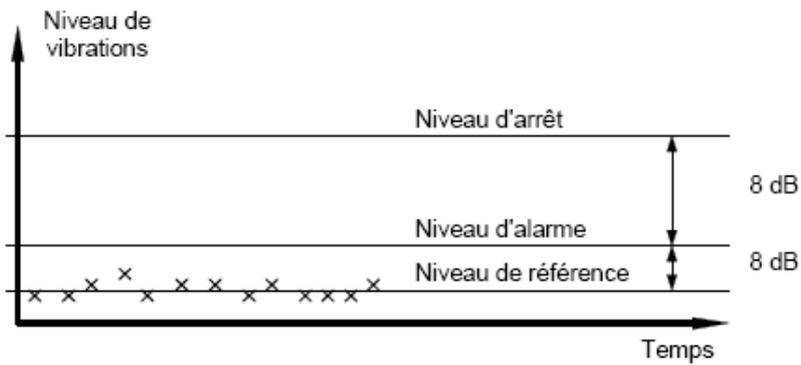


Fig. IV.10: La détermination des seuils par la méthode du relevé global [37].

Cette méthode pourra être utilisée lorsque les défauts à surveiller émettent des vibrations très importantes, comme le balourd ou les défauts de lignage (Fig.IV.12). La mesure du niveau global est bien adaptée au suivi des défauts très énergétiques

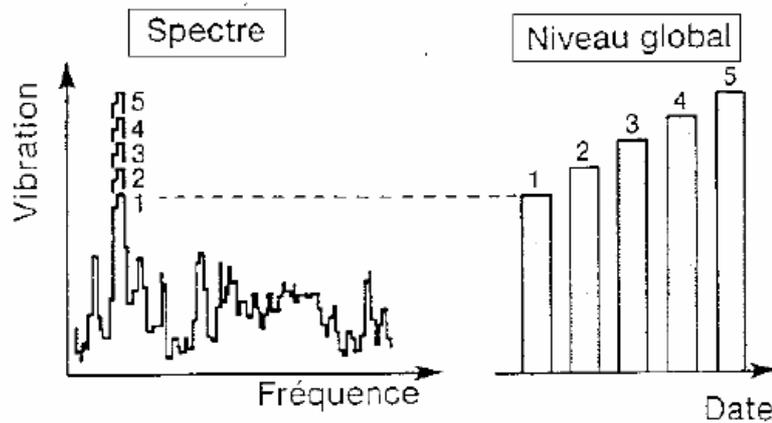


Fig. IV.11: L'utilisation des NG pour le suivi des défauts très énergétiques [37].

IV.4.6.2. Méthode de l'analyse spectrale

Les seuils d'alarme et d'arrêt sont déterminés selon la même méthode que précédemment, sur le spectre au lieu de la mesure globale (Fig. IV.13).

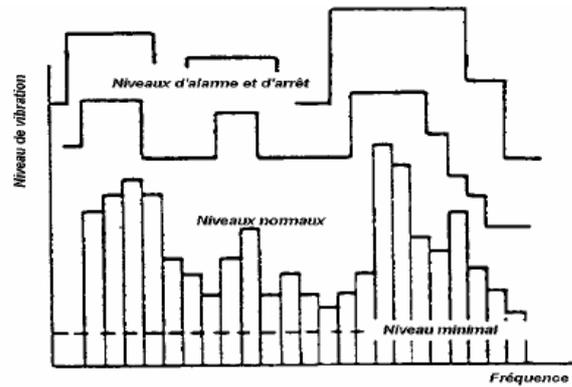


Fig. IV.12: Détermination des seuils en analyse spectrale [37].

Cette méthode devra être préférée lorsque les défauts à surveiller émettent des vibrations très faibles, comme les défauts d'engrènement ou de roulement (fig. IV.14).

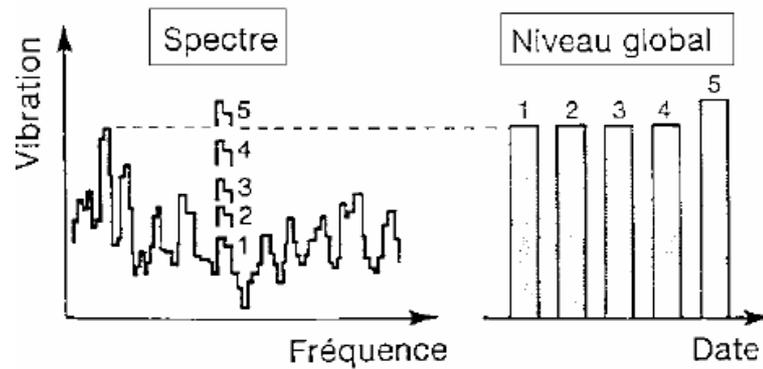


Fig. IV.13 : L'utilisation de la mesure du spectre au suivi des défauts de faible amplitude [27].

On peut ainsi suivre l'évolution d'une bande de fréquences, au lieu de suivre une simple mesure globale (fig.IV.15).

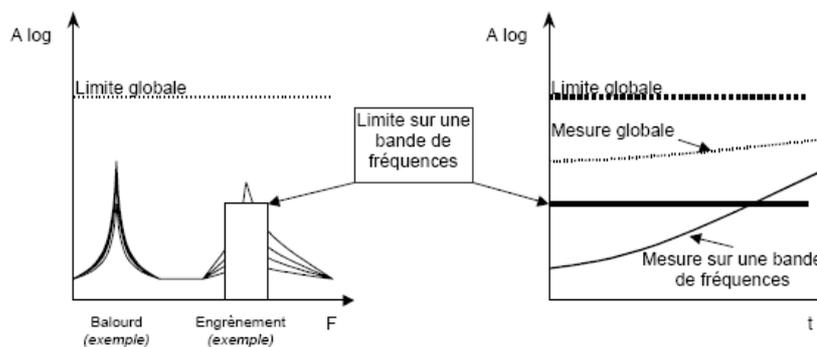


Fig. IV.14: Surveillance d'une bande de fréquences [37]

IV.7. Diagnostic

Le diagnostic, est un outil particulièrement utile dans le cadre de la mise en place d'un concept de maintenance prévisionnelle. La démarche du diagnostic repose sur l'analyse systématique du signal vibratoire, tant sa forme spectrale que temporelle, pour l'identification de la nature des défauts à un stade précoce. Dans la pratique, la présence des défauts aux fréquences caractéristiques n'est pas toujours facile à déceler. Pour les mettre en évidence, on fait appel à des techniques d'investigation généralement plus poussées que le simple suivi d'indicateurs scalaires, commandées par la complexité et la précision du diagnostic demandé en fonction des enjeux économiques liés à la panne redoutée.

Les techniques utilisées sont principalement :

- Le suivi du niveau vibratoire (niveaux globaux) ;
- L'analyse des spectres vibratoires sur des plages de fréquences plus au moins étroites ;
- L'amélioration de la résolution ou l'utilisation d'un zoom ;
- La détection d'enveloppe (démodulation d'amplitude centrée sur une résonance) ;
- L'examen des harmoniques et sous-harmoniques éventuelles ;
- L'étude des bandes latérales de modulations centrées sur une fréquence caractéristique ;
- L'examen et le suivi des valeurs cepstrales ;
- La recherche des modes de fréquences propres...

A noter que les techniques développées ci-après sont principalement destinées à la surveillance des machines tournant en continu, sans variation de vitesse pendant la prise des mesures. Pour la surveillance des machines alternatives (robots, machines cycliques, pistons...), il existe des techniques mieux adaptées (ondelette, fonction de Vignerville...) souvent encore économiquement justifiable que sur peu d'équipements particulièrement sensibles [35].

IV.7.1.Principaux outils de diagnostic

IV.7.1.1. Analyse temporelle :

Les capteurs tels que les accéléromètres, délivrent un signal composé de N points de mesure à intervalle de temps régulier. La première observation possible d'un signal est donc sa représentation temporelle qui peut être aisément, employé lorsque, le signal est simple

(vibration de type sinusoïdal du balourd d'un rotor par exemple), mais devient inexploitable dans le cas de sollicitations multiples et de faible influence de défauts.

Un autre intérêt de l'analyse temporelle, est qu'elle permet de connaître les variations des amplitudes instantanées des fonctions de modulations et surtout le nombre de ces variations par tour d'arbre puisque les fonctions de modulation sont beaucoup plus "lisibles" par rapport à l'analyse spectral. Il est ainsi facile par exemple de connaître le nombre de dents écaillées d'un engrenage et de les positionner l'une par rapport à l'autre [38].

Plusieurs indicateurs globaux ont été définis à partir de l'analyse temporelle afin de caractériser la forme de celle-ci, mais une telle démarche ne permet pas de détecter de manière fiable un défaut, ni d'identifier son origine. Les domaines: spectral, cepstral, ou de l'enveloppe sont en général plus adaptés au diagnostic [5].

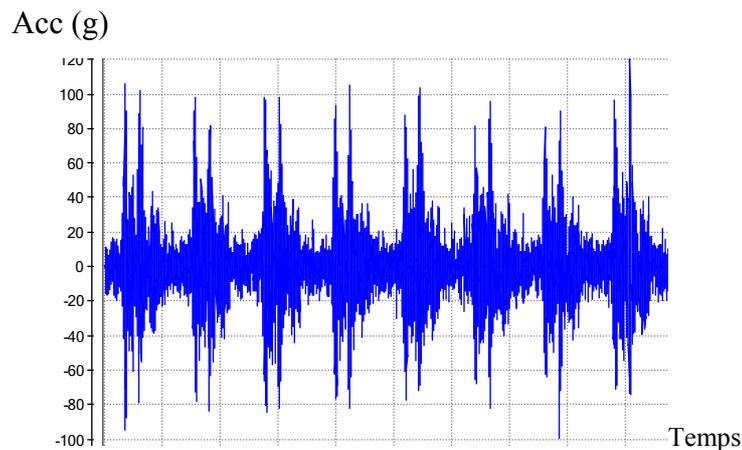


Fig.IV.15: signal temporel de mesure d'accélération au palier en présence de défauts multiples.

IV.7.1.2. Analyse fréquentielle:

Le signal mesuré est considéré comme une combinaison des réponses des composantes constituant le système. La plus part des fréquences caractéristiques sont proportionnelles à la fréquence de rotation des arbres. Un signal quelconque $s(t)$ peut être décomposé en signaux sinusoïdaux élémentaires. L'analyse spectrale consiste à identifier la fréquence et l'amplitude de ces sinus, et elle est obtenue à partir d'une transformée de Fourier du signal temporel. On obtient un spectre sous forme d'un graphique montrant l'amplitude à chaque fréquence appelée spectrogramme.

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t).e^{-2\Pi ft} dt \quad (\text{IV.12})$$

Numériquement, la transformée de Fourier discrète correspondante s'exprime :

$$S(k) = \sum s(j)W_N^{(j-1)(k-1)} \quad (\text{IV.13})$$

avec $W_N = e^{(-2\Pi i)/N}$ (IV.14)

L'interprétation des spectres consiste à trouver l'origine cinématique des composantes ou familles de composantes les plus énergétiques. La lecture d'un spectre nécessite donc le maximum de renseignements concernant les conditions de fonctionnement du système : type de roulement, vitesse de rotation, nombre de dents des engrenages (Fig.IV.16).

Notons que par définition; une vibration pure ne comporte qu'une seule fréquence, donc une seule raie. Par contre, une vibration harmonique comporte un ensemble de raies, celles des vibrations pures sommées [33].

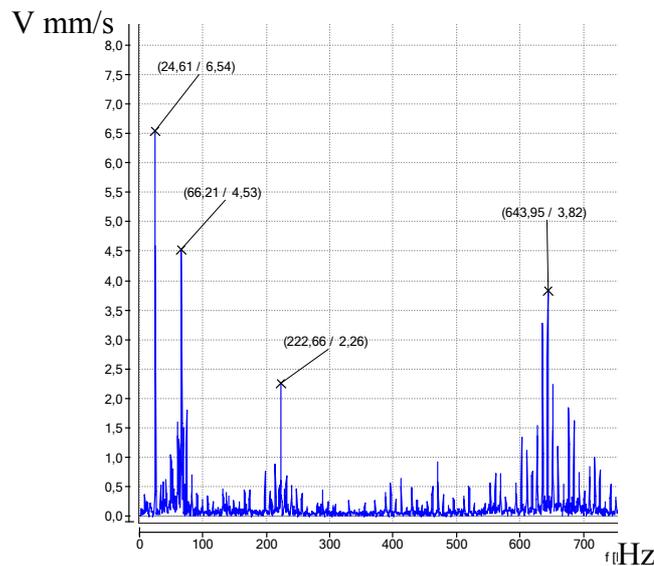


Fig.IV.16: Spectre caractéristique des signaux de vitesse aux paliers

Les familles de composantes émergeant sous l'influence de défauts peuvent se présenter tant sous forme de peignes de raies que sous forme de bandes latérales de modulation autour d'une fréquence cinématique (fréquence d'engrènement, fréquence de rotation...). On utilise alors l'outil cepstre, adapté à la mise en évidence des défauts induisant des chocs périodiques ou une modulation en amplitude [5].

IV.7.1.3. Démodulation d'amplitude: ou « **détection d'enveloppe** ».

Sur les machines tournantes, plusieurs défauts se traduisent par une modulation de l'amplitude ou de la fréquence du signal vibratoire. D'une manière générale, la modulation d'amplitude est induite par des défauts de forme (faux-rond, excentricité, déformation...). la modulation de fréquence s'explique quant à elle par les variations périodiques de la vitesse de rotation instantanée, consécutives à la présence de jeux angulaires, de phénomènes de torsion, ou de variations périodiques de couple ou de charge (jeux d'accouplement, de clavette, fissures, criques et écaillages de denture, rupture de barres rotoriques de cage moteur asynchrone...).

La détection d'enveloppe est un traitement qui permet l'étude des phénomènes de modulation. Elle permet la mise en évidence de la fréquence modulante, et de déterminer de manière fiable et rapide les fréquences de répétition des chocs souvent noyées dans un spectre de raies plus énergétiques. Son principe consiste à filtrer en passe-bande le signal temporel, et à réaliser ensuite la transformée de Fourier de l'enveloppe du signal obtenu. Cette méthode est intéressante pour réaliser un diagnostic à un stade précoce, car elle permet de s'affranchir des signaux parasites basse fréquence émis par d'autres défauts de la machine (balourd, désalignement, etc.), et de ne garder que les signaux émis par les défauts à haute fréquence, notamment lorsque le défaut recherché excite un mode de résonance de la structure ce qui est fréquemment le cas en mécanique ou beaucoup de défaut engendrent des forces impulsionnelles qui excite des modes de résonance de la structure bien avant de se manifester à leur propre fréquence cinématique. En analyse vibratoire, elle est préconisée pour le diagnostic de défauts de roulements à un stade précoce, ainsi que pour l'étude des phénomènes de modulation mécaniques (engrènement) ou électriques (moteurs asynchrones). [37-24-39].

IV.7.1.4. analyse cepstrale

Le cepstre est une fonction du traitement du signal qui consiste à partir du domaine temporelle, à passer dans le domaine des fréquences, et à revenir dans le domaine temporel. Par définition, le cepstre est la transformée de Fourier inverse du logarithme du spectre de puissance, et il a pour effet déconvoluer la réponse impulsionnelle (de la structure à examiner) des forces d'excitation. Le cepstre peut être utilisé avec succès pour la surveillance de l'apparition et de l'évolution d'un certain nombre de défauts induisant :

- des chocs périodiques (desserrages, jeux, écaillages de roulements, défauts de dentures...)
- une modulation en amplitude ou en fréquence de composantes cinématiques (fréquence de rotation, d'engrènement, d'accouplement, de passage d'ailettes, d'encoches...) traduisant l'existence d'excentricité ou de fluctuation périodiques de couple ou de vitesse de rotation instantanée (jeux d'accouplement, usure de clavette, écaillage de denture, rupture de barres de cage de moteur...) [40-33].

$$C(\tau) = F^{-1}[\log (S^2(f))] = F^{-1}[2 \log (S(f))] \quad (IV.15)$$

La variable τ , qui a la dimension d'un temps, est appelée quéfrence. Une petite quéfrence représente des espacements grands entre les fluctuations dans le spectre et une haute quéfrence des espacements petits [5].

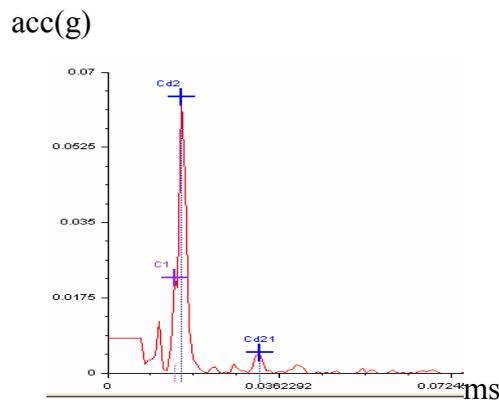


Fig.IV.17: Cepstre de signal d'accélération à un palier avec défaut de roulement.

Le cepstre est donc une technique précieuse de traitement du signal, qui permet la détection précoce de l'apparition et de l'évolution de défaut, mais elle est paradoxalement encore méconnue des mécaniciens malgré son excellente adaptation au traitement des signaux vibratoires induits par les machines. Il constitue une aide efficace à l'interprétation des spectres, en permettant une identification rapide de structures périodiques spectrales souvent complexes [16]. Cet outil puissant, est désormais utilisé dans les systèmes experts industriels. Il nécessite cependant les compétences de spécialistes, pour le choix du nombre de points de l'échantillon et ainsi que le facteur de ré-échantillonnage, afin d'avoir une amplitude significative des pics à surveiller.

IV.8. Défauts de roulement

Les roulements sont des composants stratégiques des machines tournantes: situés entre les parties fixes et les parties mobiles de la structure, ils assurent la transmission des efforts et la rotation de l'arbre. Mais ces composants sont aussi les plus fragiles. Il faut dire que les différents éléments qui les constituent (les billes, la cage et les bagues) sont en permanence sollicités [39]. Les vibrations générées au sein d'un roulement sont de faible amplitude, ressemblant à un bruit aléatoire. Lors de l'apparition d'une avarie, une impulsion se produit chaque fois que le défaut participe à un contact (chocs périodiques). L'avarie a donc une fréquence caractéristique qui dépend de la géométrie du roulement et de l'emplacement de l'écaillage (sur la bague intérieure, sur la bague extérieure, ou sur un élément roulant) [5] (voir Tab.IV.5).

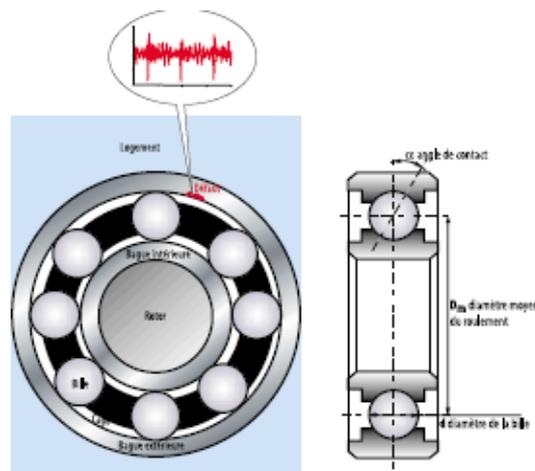


Fig.IV.18: Représentation de défaut sur la bague extérieure d'un roulement [SKF].

	Fréquences d'apparition
Défaut sur la piste externe	$F_{ext}(Hz) = \frac{n}{2} F_r \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \alpha\right)$
Défaut sur la piste interne	$F_{int}(Hz) = \frac{n}{2} F_r \left(1 + \frac{d}{D_m} \cos \alpha\right)$
Défaut sur la bille	$F_{bille}(Hz) = \frac{D_m}{d} F_r \left[1 - \left(\frac{d}{D_m} \cos \alpha\right)^2\right]$
Défaut sur la cage	$F_{cage}(Hz) = \frac{1}{2} F_r \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \alpha\right)$

Tableau.IV.4: fréquence caractéristiques des défauts de roulements.

Pour éviter les arrêts de production coûteux, dus à la défaillance imprévue des roulements, il faut en permanence les surveiller, et “traquer” l'apparition du moindre défaut. Pour cela, plusieurs techniques peuvent être adaptées.

Des méthodes classiques d'analyse vibratoire (détection d'enveloppe, analyse du cepstre, kurtosis, facteur de crête, etc.) à des techniques plus spécifiques telles que l'onde de choc, elles permettent de détecter les défauts à un stade plus ou moins précoce.

Principales méthodes de surveillance vibratoire		
Indicateurs simples	Principaux avantages	Principales limitations
Niveau global (mesure d'accélération)	Indicateur simple et fiable	- Détection tardive - Diagnostic difficile - Peu adapté aux faibles vitesses de rotation - Détermination des seuils empirique
- Kurtosis (moment statistique d'ordre 4)	- Adapté à la surveillance des roulements des arbres tournant à de faibles vitesses de rotation (<600 t/min) - Détection à un stade précoce - Grande sensibilité aux chocs périodiques et non périodiques	- Décroissance de l'indicateur en fin de vie du roulement - Diagnostic souvent difficile
- Facteur de crête (rapport entre la valeur crête et la valeur efficace)	- Indépendant des conditions de fonctionnement (dimensions du roulement, charge, vitesse de rotation...)	- Décroit lorsque les défauts se développent
- Facteur de défaut (combinaison du facteur de crête et de la valeur efficace)	- Croît pendant toute la phase de dégradation du roulement - Détection à un stade précoce - Peu sensible aux conditions de fonctionnement	- Diagnostic souvent difficile - Peu adapté aux faibles vitesses de rotation

Tableau. IV.5: Indicateurs simples de surveillance vibratoire dérivée du signal temporel [39].

IV.9. Conclusion

Maintenir un système de production n'est pas une tâche facile. Ceci exige, entre autres, des ressources humaines compétentes, des outils, et du matériel adapté aux équipements ainsi qu'aux installations à maintenir. Pour assurer une maintenance conditionnelle efficace, plusieurs outils peuvent être utilisés : l'analyse d'huile, thermographie.

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

En plaçant des accéléromètres aux endroits où se transmettent ces efforts (c'est-à-dire sur les paliers des machines), on peut alors suivre l'état de santé de l'équipement. La méthode présente trois gros avantages : les mesures sont faciles à prendre, les défauts sont détectés à un stade précoce, et il est possible de réaliser un diagnostic approfondi pour en connaître l'origine.

Chapitre V

Etude de cas

Le Suivi de diagnostic vibratoire du :
Broyeur Clinker M15-16H002 (ON-LINE)
Ventilateur R1S07 (OFF-LINE)

Chapitre V : le Suivi et le Diagnostic appliqué à des cas réels.

V.1. Cas du suivi On-line du broyeur clinker M15-16H002

Stratégie considérée pour l'exploitation du matériel de suivi de maintenance SCV (OMNITREND).

Tout d'abord, ma tâche a consisté à étudier le lieu de travail dans le contexte de la démarche " Qui ? Fait quoi ? Quand ? et comment ?". J'ai donc identifié les espaces de travail et les fonctions techniques partagées (Chap. III). Des cas d'exemples de suivi On-line et off line ont été étudiés. La tendance des pannes constatées se situe essentiellement au niveau des cas de balourds fréquents, ainsi que les mauvais alignements d'arbres. C'est pourquoi nous avons pris comme exemple un cas réel vécu durant ma période de stage, celui **du broyeur clinker** qui tourne à 1000tr/mn ($f_r=16.66$ Hz). Le système de surveillance focalise notre attention sur l'essentiel des anomalies déclarées. La démarche pour l'investigation, consiste en premier lieu, de faire une analyse des NG vit (niveau globale vitesse) qui déclare le problème dans son ensemble, ce qui nécessite de faire une analyse poussée utilisant la méthode de l'analyse spectrale pour identifier l'origine du problème. En se référant au spectre de vitesse, l'amplitude vibratoire est élevée au niveau de la 2^{ème} harmonique de la fréquence de rotation 32.81 Hz et 6.14 mm/s (2xrpm), ce qui dénonce un défaut typique d'alignement (Voir spectre).

Tendance du niveau global NGvit avant intervention

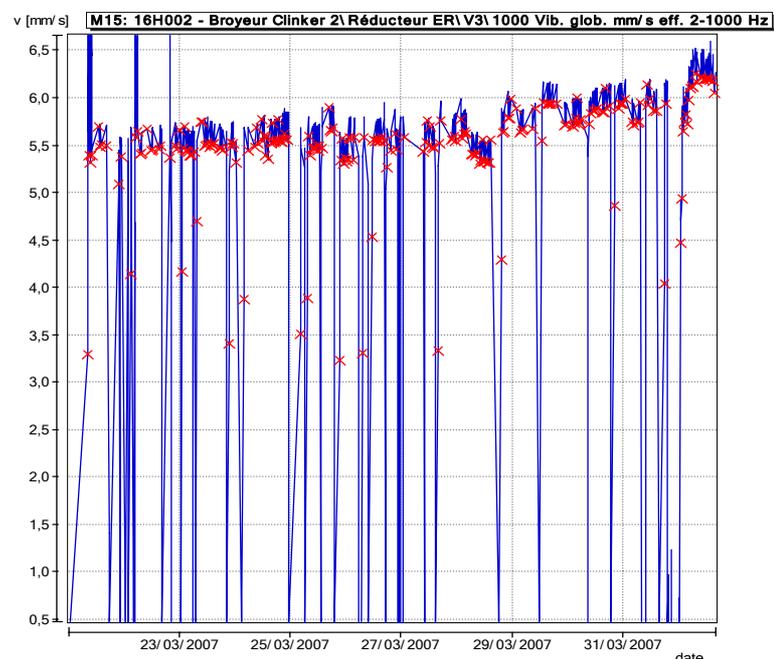


Fig.V.1: NGvit avant intervention

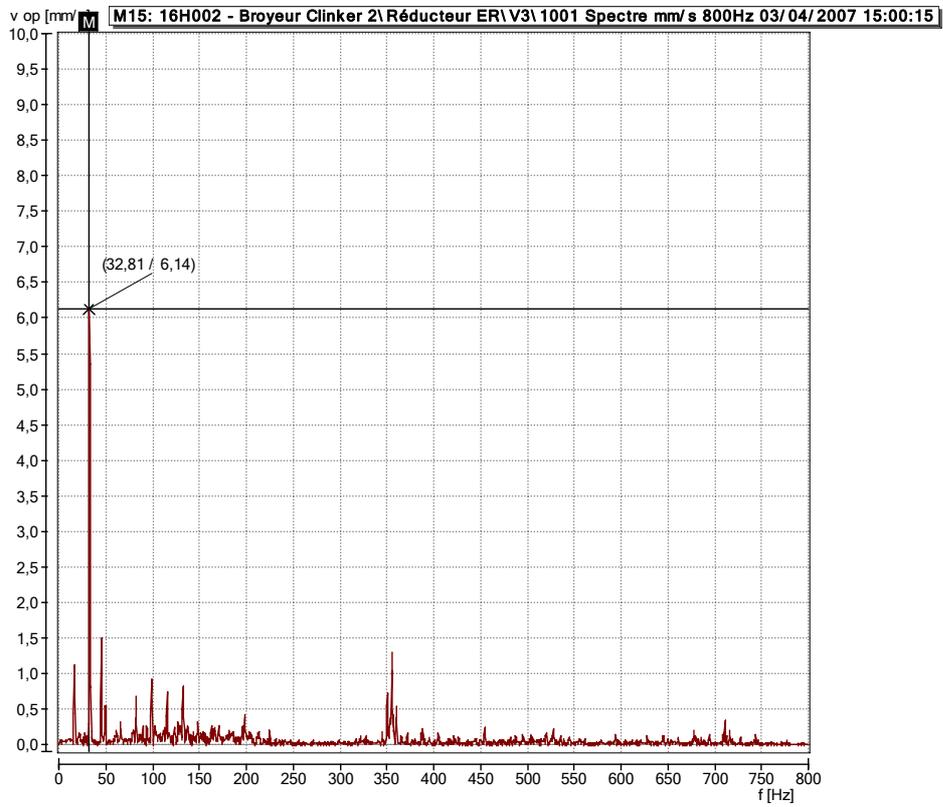


Fig.V.2: Spectre avant intervention

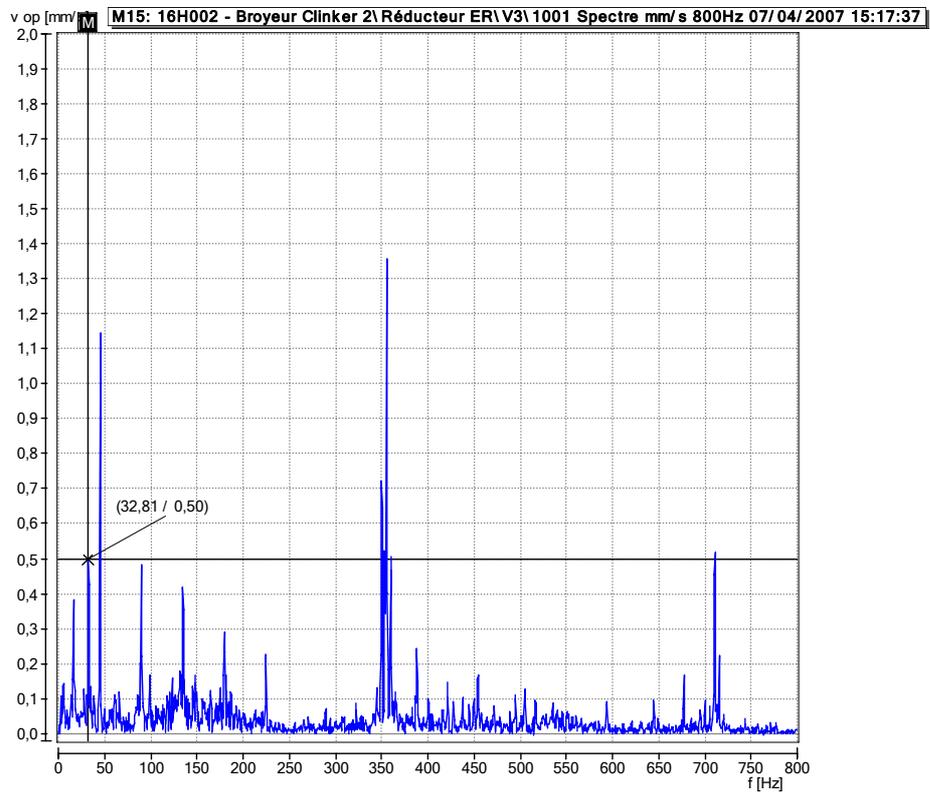


Fig.V.3: Spectre après intervention

Après intervention de l'équipe de maintenance qui a effectué un alignement, on a obtenu une nette diminution des vibrations allant d'un niveau de pic d'amplitude de 6.14 mm/s vers un seuil rétabli à 0,50 mm/s. Ce qui représente une amélioration en pourcentage de 91.88% qu'on peut distinguer par confrontation respectivement des figures de tendance, et de spectre ci-dessous (Fig.V.4).

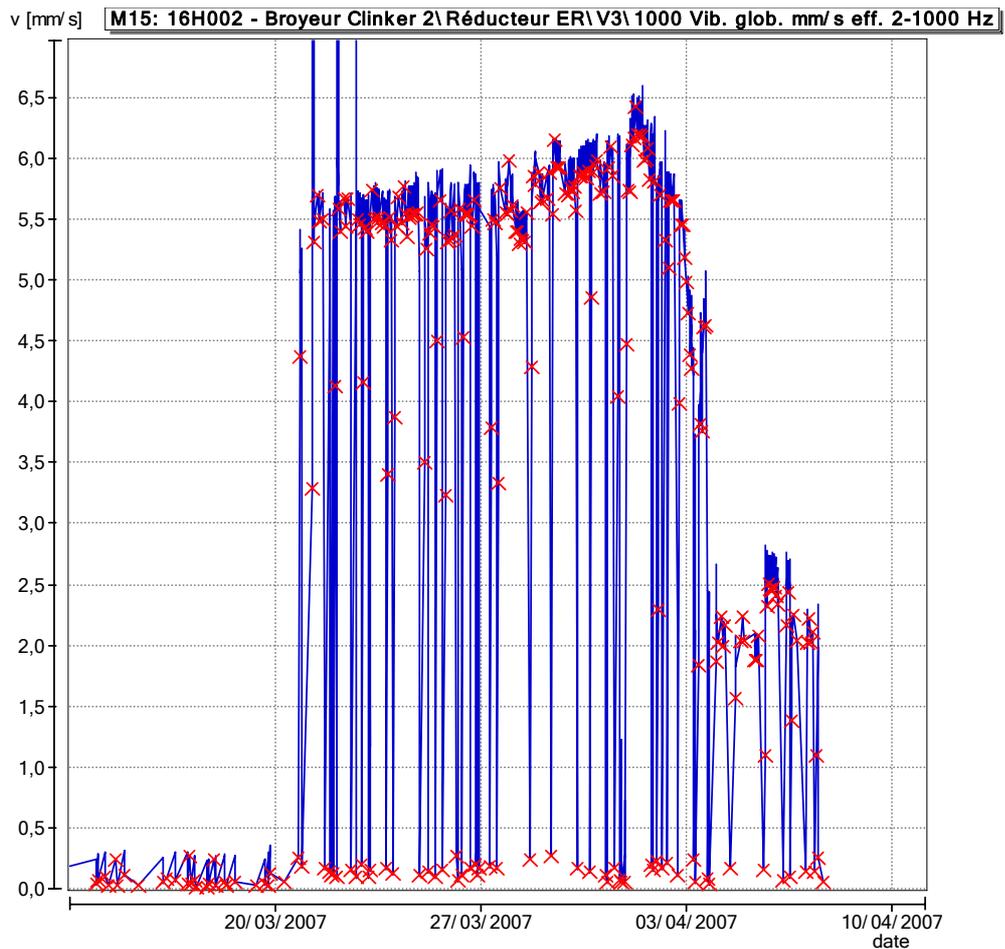


Fig.V.4 : Evolution du NGvit avant et après intervention

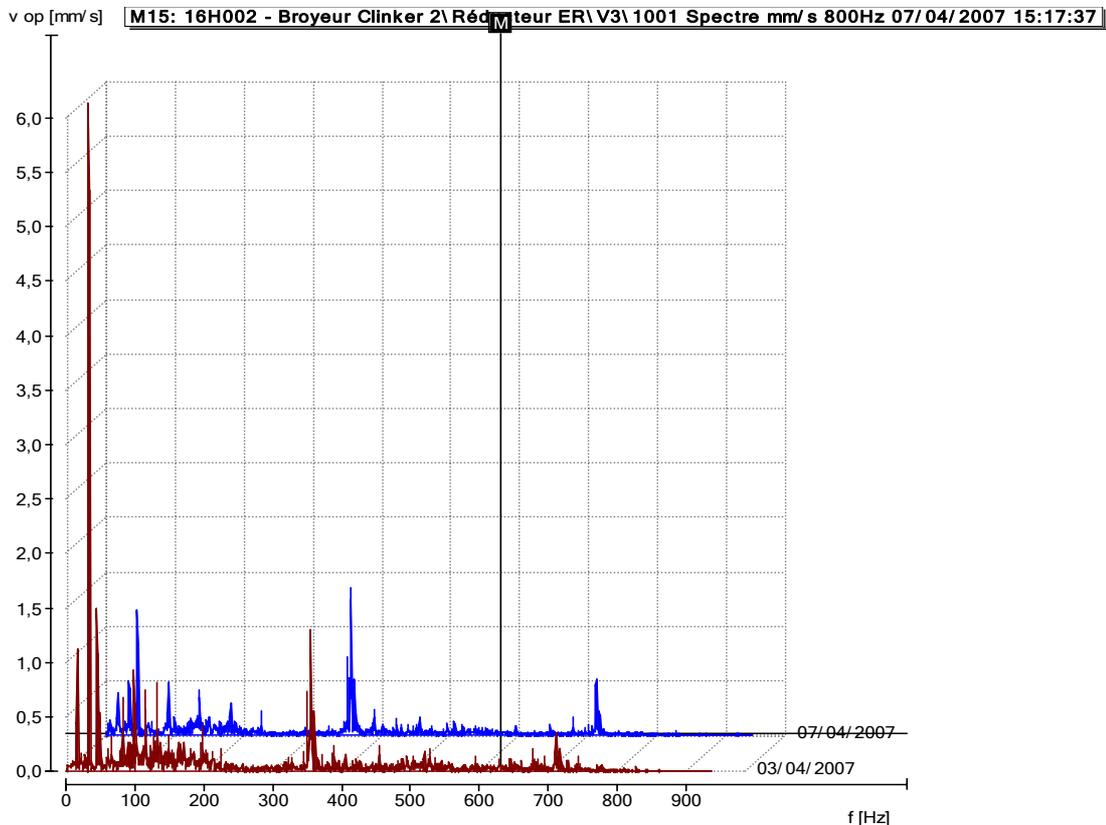


Fig.V.5: Spectres en cascade pour la mise en contraste des atténuations résultantes de l'intervention

V.2. Le Suivi Off Line du diagnostic vibratoire du ventilateur R1S07

V.2. 1. Introduction

L'objet de cette étude est le diagnostic du ventilateur de tirage **R1S07** de la zone cru de la cimenterie. L'investigation se résume aux tâches typiques suivantes :

- caractérisation du comportement vibratoire.
- Suivre l'évolution de l'état de l'équipement.
- Identifier les causes probables de détérioration de ses composants.
- Evaluer le degré de sévérité de ces détériorations.
- Dégager un rapport d'expertise.

Le ventilateur étant composé du moteur électrique, du réducteur, de la turbine et des paliers qui constitue une chaîne rigide. Un défaut sur un de ces composants peut influencer négativement sur le comportement global de l'équipement.

Les statistiques concernant les causes de défaillances, et la localisation des défauts dans les transmissions de puissance à engrenages permettent de conclure que les organes les plus sensibles sont les engrenages et les roulements (tableau V.1)

Localisation des défauts	%
Dentures	60
Paliers	19
Arbres	10
Carters	7
autres	4

Tableau .V.1. Localisation des défauts dans les transmissions de puissance à engrenages [5]

Le diagnostic portera donc sur toute la chaîne synoptique du ventilateur (Fig.V.1) selon les étapes effectuées suivantes :

- Collecte des informations techniques sur l'équipement;
- Calcul de la cinématique;
- Choix des paramètres;
- Configuration des points de mesure;
- Collecte des mesures;
- Analyse et interprétation des données;

V.2. Matériel pour diagnostic :

Le matériel d'analyse vibratoire utilisé dans le cadre de ce diagnostic est constitué principalement de :

- **Un collecteur analyseur** de données portable appelé « movilog2 » qui présente une synthèse très avancée des recherches, notamment en informatique et en électronique de pointe.

- **Accéléromètre ASH 201**

- **Logiciel d'analyse vibratoire DIVA** conçu spécialement pour la maintenance conditionnelle et prédictive, pour le traitement des signaux émis par les différents types de vibrations engendrées par les différents composants de machine.

V.3. Application à l'Etude du Ventilateur

Le ventilateur comprend essentiellement :

- Un moteur d'entraînement Siemens Espagne
- Un accouplement flexible.
- Un réducteur de marque ACMI
- Une turbine à aubes montées sur un arbre avec 2 paliers SKF, munis de roulements à rouleaux coniques.

Conception d'après le fournisseur industriel FLS

Code installation de la machine (Fig.V.6) : R1S07VE

Les caractéristiques techniques principales sont reprises sur les fiches techniques ci-dessus.

Notons que les données techniques principales, sont nécessaires pour la classification de l'équipement, et la détermination des seuils d'alarme, pour l'établissement de la signature vibratoire du ventilateur. [Voir annexe.II. Tableau 1-2]



Fig.V.6: Réducteur: vue sur site.

V.3.1. Etude cinématique

V.3.1.1. La chaîne cinématique

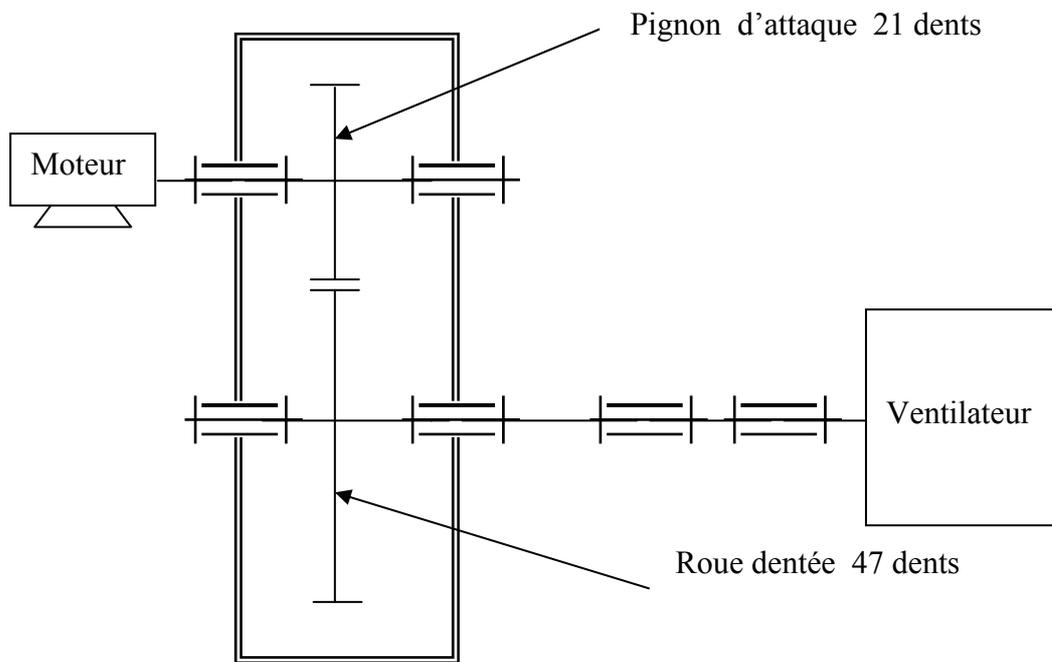


Fig.V.7: Chaîne cinématique

V.3.1.2. Élément cinématique

Moteur

Puissance		840 kw
Tension		5500 V
Intensité		106 A
vitesse		1482 tr/mn
Roulements	Coté Attaque	NU 226
	Coté oppose	NU 222

Ventilateur

Nbre de pales		8
température		85 C°
vitesse		645 tr/mn
roulements	Palier fixe	22340CC/C3/W33
	Palier mobile	22348CC/C3/W33

Réducteur

Puissance		840 kw
Tension		5500 V
Intensité		106 A
Vitesse	Entrée	1482 rpm
	Sortie	653 rpm
Nbre de dent	Pignon	Z=21
	Roue	Z=47
roulements	Entrée	FAG 32226 A
	Sortie	FAG 33030

Tableau V.2. Fiche technique des équipements.**V.3.1.3. Calcul des données techniques principales :**

Le calcul de la cinématique de l'équipement est nécessaire pour la définition de la signature vibratoire qui constitue en fait la référence (indicateur) de base pour le suivi vibratoire. Elle définit les fréquences d'apparition des anomalies, et délimite les seuils minimums et maximums des amplitudes vibratoires de chaque organe.

Sur le schéma synoptique (Fig.V.8) sont représentés tous les éléments constituant le ventilateur, le moteur, la turbine...etc. ainsi que les points de mesure sur lesquels est disposé l'accéléromètre pour la mesure des vibrations. Ces points correspondent aux paliers qui supportent les efforts auxquels est soumis le ventilateur. Les fréquences du ventilateur R1S07, sont obtenues (Tab.V.3) après substitution des données figurant dans les tableaux indiquée ci-dessus (Tab.V.4).

Désignation	Fréquence
La fréquence de rotation (fréquence du moteur)	24.7 Hz
Fréquence pignon d'attaque	24.7 Hz
fréquence d'engrènement	522 Hz
Fréquence roue dentée	10.883 Hz
Fréquence turbine	10.883 Hz

Tableau V.3: les fréquences du ventilateur R1S07

	F_{ER}	F_{ext}	F_{int}	F_{cage}
Moteur				
- Roul. Coté Attaque: NU 226	182.039	192.66	251.94	10.621
- Roul. Coté oppose: NU 222	163.02	168.207	226.746	10.374
Reducteur :				
Roulement entré FAG 32210 A.	163.267	201.058	267.995	10.374
Roulement Sortie FAG 33030 :	178.087	225.264	293.436	10.621
Ventilateur :				
Roulement Palier Fixe: 22340CC/C3/W33	58,97	67,35	95,85	4,46
Roulement Palier mobile: 22348CC/C3/W33	61.25	72.35	101.73	4.57

Tableau V.4: les fréquences des défauts des roulements du ventilateur R1S07

V.4. La configuration des points de mesure

Les vibrations étant le résultat des efforts, qui 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.

Pour détecter de façon précoce une défectuosité de la machine, on doit choisir les positions de mesure et le nombre de direction de la mesure à chaque position. Ce choix de la (ou des) directions de mesure sera guidé par le type de défaut qu'on prévoit de détecter à l'endroit considéré (lignage, balourd, serrage, etc.), par le coût impliqué par le nombre de mesures et par une estimation de la rigidité de la structure dans chaque direction.

La mesure principale devra se faire suivant la direction de l'effort. On conçoit ainsi que les meilleurs points de mesurage dans le cadre de la maintenance des machines sont les paliers. Le mesurage pouvant être effectué dans les directions des trois axes orthogonaux de coordonnées (verticale, horizontale, axiale).

Pour le ventilateur R1S07, il est constitué de 8 paliers, pour chaque palier 3 points de mesure (horizontale, verticale, axiale), donc un totale de 24 points de mesure pour toute la machine, voir (Fig. V.8).

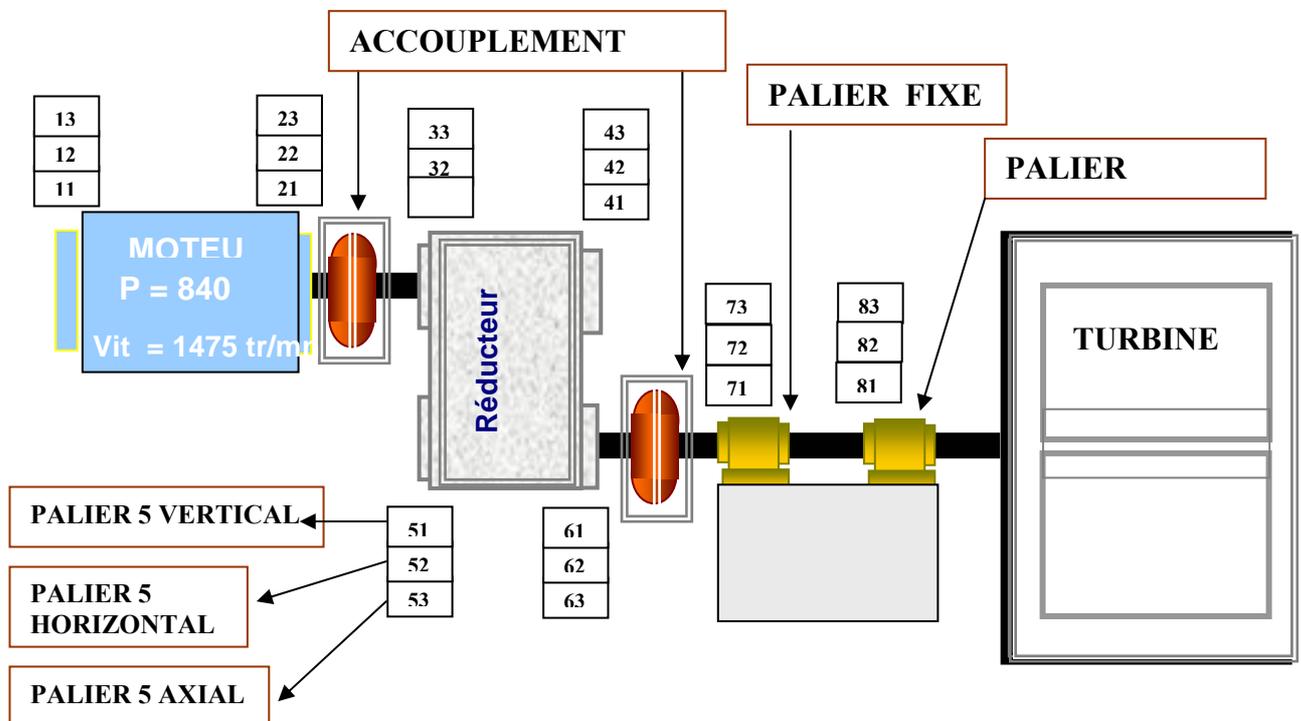


Fig. V.8: Le synoptique du ventilateur R1S07.

V.5. La méthodologie de diagnostic:

La surveillance des machines commence par le suivi des indicateurs en mode global, ce type de suivi peu coûteux et rapide permet ainsi de connaître l'état vibratoire de la machine et d'en surveiller l'évolution, sans pouvoir toutefois déterminer la cause de la vibration.

Pour l'analyse du comportement vibratoire global du ventilateur, on choisit les paramètres suivants :

V.5.1. Niveau global accélération :

Ce paramètre est mesuré sur une bande large, spectre pour capter principalement les défauts surgissant à haute fréquence, tels que les défauts d'engrènement et les résonances des roulements. C'est la première approche pour l'analyse; mais pour une meilleure compréhension de l'état vibratoire global du ventilateur, l'analyse des autres paramètres est indispensable.

V.5.2. Niveau global vitesse :

L'observation du comportement vibratoire du ventilateur à travers ce paramètre donne des informations sur les anomalies qui apparaissent en moyenne et basse fréquence, tels que balourd, délignage, arbre fléchi ...etc.

Remarque: importante concernant la mesure par niveau global

L'effet de masque est l'écueil le plus sérieux de ce type de suivi:

$$NG = \sqrt{(a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + \dots)} \quad [29]$$

avec a, b, c, d,...les amplitudes respectives des composantes A, B, C, D, ...

Compte tenu de cette élévation au carré, il est certain que cette valeur de NG est essentiellement sensible à l'évolution de défauts induisant des vibrations d'amplitude élevée et que l'évolution importante d'un défaut induisant des vibrations d'amplitude moindre, risque d'être complètement masquée, (Défaut roulement).

Pour minimiser les interférences (le danger) de l'effet de masque, on va choisir de nouveaux indicateurs :

V.5.3. Le Facteur de Défaut de Roulement DEF

Le « DEF » est un traitement spécifique du signal temporel, adapté à la surveillance des roulements, et est calculé en fonction de V_C et R_{ms} .

$$DEF = a \times F_C + b \times V_{Eff}$$

Combinant les indicateurs Facteur de Crête (FC) et Valeur efficace (ARMS), et de ce fait, le « DEF » améliore l'indice de confiance dans la tâche d'identification du degré de sévérité.

V.5.4 Indicateur d'après la fréquence d'engrènement F_e , avec ses harmoniques

Pour les engrenages on va suivre la fréquence d'engrènement « F_e », et ces harmoniques (deuxième et troisième $2F_e$ et $3F_e$). C'est des indicateurs très fiables pour la détection précoce des défauts d'engrenages.

Nous avons conçus un ensemble de quatre gammes spectrales (200Hz, 1000Hz, 10000Hz, 20000Hz). Le spectre concaténé est un spectre unique avec la résolution fréquentielle adaptée dans chaque gamme de fréquences ce qui permet de faire ressortir les défauts en basse, moyenne et en haute fréquence, avec l'utilisation des outils d'analyse puissants tels que les curseurs harmoniques et les curseurs de bandes latérales

V.5.5. l'analyse par Cepstre et Enveloppe

Ces options disponibles dans le DIVA, mais cependant non suffisamment exploitées, par le personnel technique, constitue un outil efficace pour l'amélioration du diagnostic. D'après nos constatations, l'analyse en domaine fréquentiel telle que pratiquée, reste pour certain défauts insuffisante, et doit être comblée par l'apport complémentaire d'autre outils de diagnostic. Dans notre cas, nous avons considéré deux types d'analyse notamment, l'analyse cepstrale, et l'analyse d'enveloppe, en complémentarité avec l'analyse spectrale.

V.6. Investigation de la machine R1S07

La surveillance de la machine R1S07 est établie suivant un programme bien déterminé dans le cadre d'une maintenance conditionnelle prévisionnelle, un programme qui dépend de plusieurs critères, tels que l'état de la machine, sa criticité et son importance dans la production.

L'afficheur DIVA donne une vue d'ensemble des paramètres (VEP) permettant de visualiser l'état de tous les paramètres définis auparavant (Tableau.V.3), et d'appréhender l'état de la machine sous forme de pavés ou de barres. Nous avons constaté une évolution très importante et bien significative d'une dégradation dans le palier 3 et plus gravement dans le point 32 (3RH) qui représente la direction horizontale.

Ceci nous amène à concentrer notre travail sur le point 3RH.

V.6. Analyse des Résultats expérimentaux

V.6.1. Analyse du point 3RH

V.6.1.1. Analyse en niveau global

Palier	17/09/2006			8/10/2006			02/11/2006			11/12/2006		
	3AX	3RH	3RV	3AX	3RH	3RV	3AX	3RH	3RV	3AX	3RH	3RV
NG ACC[g]	4.07	5.77	5.43	6.31	7.33	6.85	7.3	8.49	9.25	10.97	11.57	9.73
NGvit [mm/s]	6.59	5.75	6.7	8.9	5.57	8.03	7.26	8.26	7.55	21.55	10.86	15.76
DEF(roulement)	6.7	8.08	7.65	9.42	8.96	9.64	9.5	10.07	10.26	10.32	10.94	10.21
Freq d'engre	0.5	0.68	0.32	0.01	0.57	0.005	0.32	0.53	0.57	5.12	1.18	4.05
2eme harmonique	1.03	1.26	1.34	0.36	1.08	0.56	0.69	0.76	1.76	4.11	1.05	0.94
3eme harmonique	0.68	1.1	1.31	0.1	2.8	0.49	0.67	3.97	4.59	1.64	4.54	3.38

Tableau.V.5: Les mesures des NG (accélération, vitesse, DEF)

Le tableau ci-dessus montre clairement les niveaux globaux : accélération (0-20000 Hz) et NGvit qui sont en évolution croissante, ainsi le DEF qui incrimine un défaut de roulement suspect, que nous allons voir ci-après:

V.6.1.1.1. Courbes de tendance

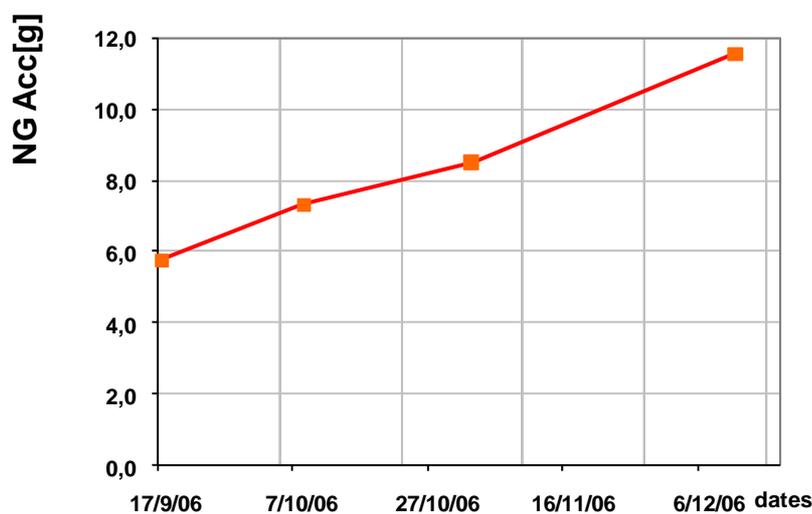


Fig.V.9: La tendance du point 3RH en NG Accélération

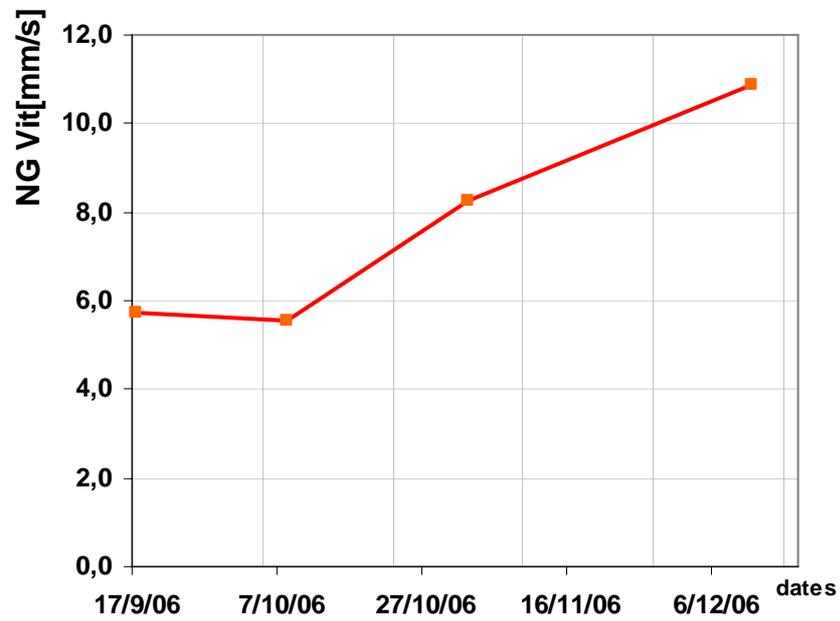


Fig. V.10: La tendance du point 3RH en Vitesse

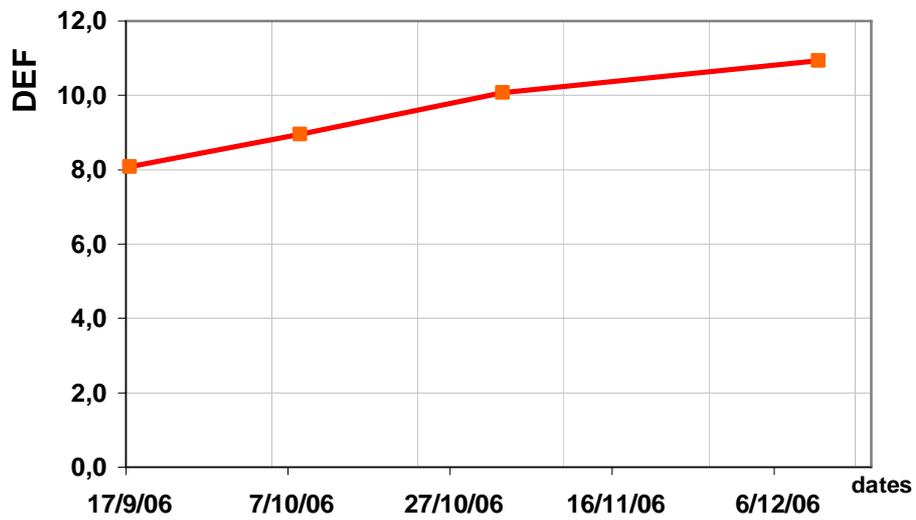


Fig.V.11: La tendance du point 3RH en DEF

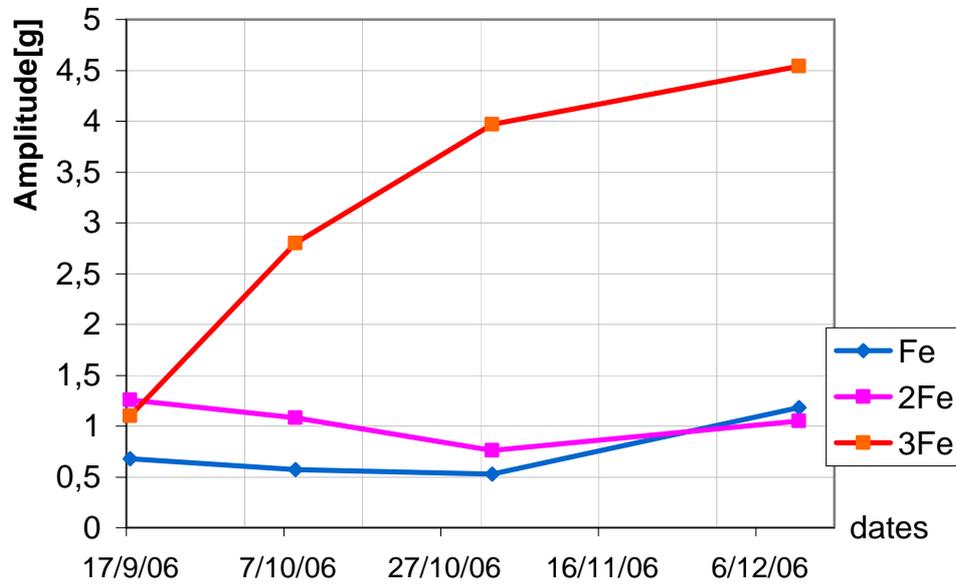
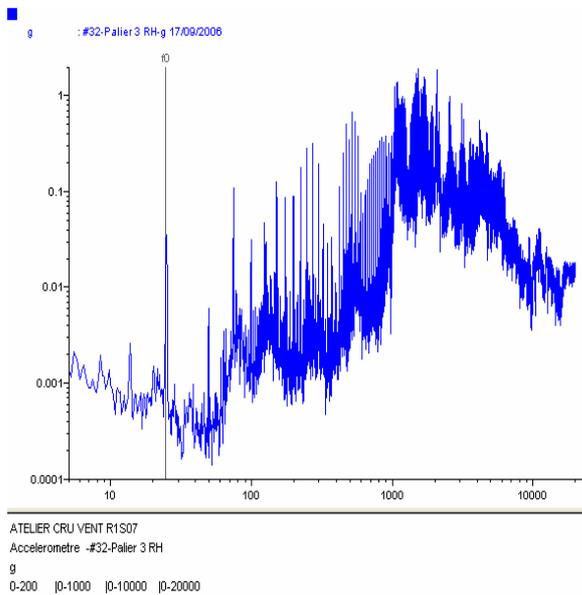


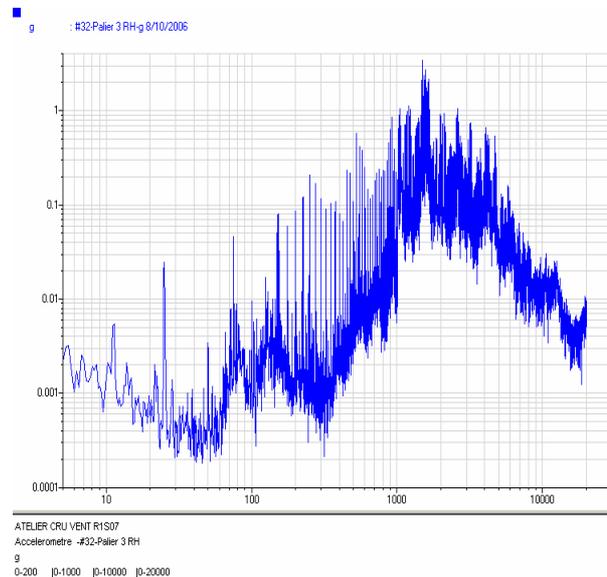
Fig.V.12: La tendance du point 3RH en Fe, 2Fe, 3Fe

V.6.1.2. l'analyse spectrale des mesures effectuées au point 3RH

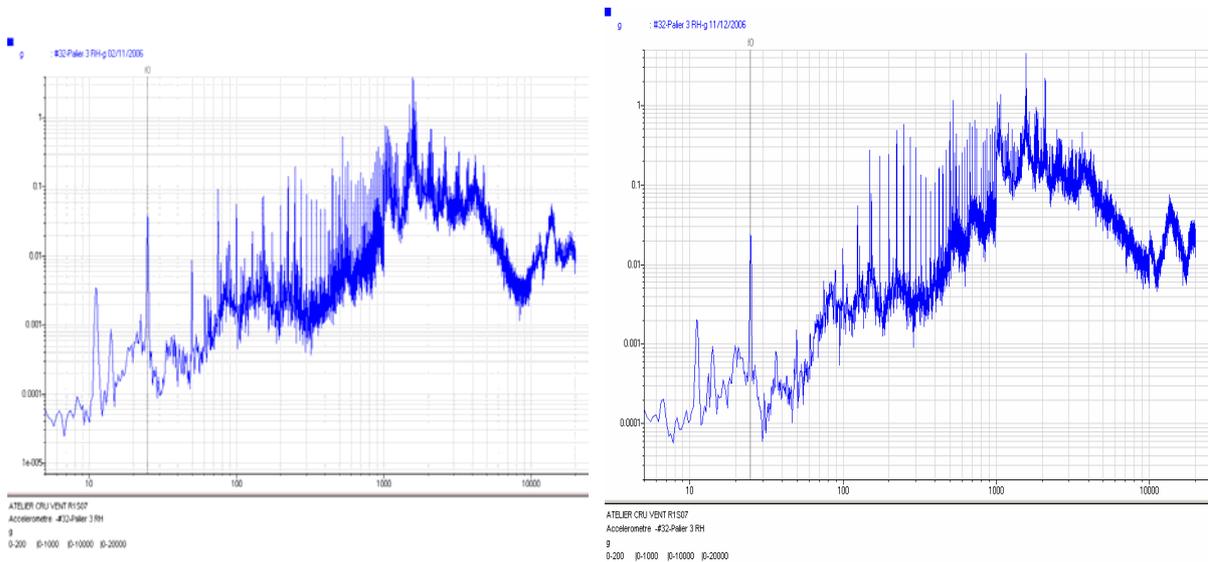
La représentation du spectre se fait suivant plusieurs échelles, dont le choix détermine la lisibilité de ce dernier :



a) Spectre concaténé le 17/09/06



b) Spectre concaténé le 08/10/06



c) Spectre concaténé le 02/11/2006

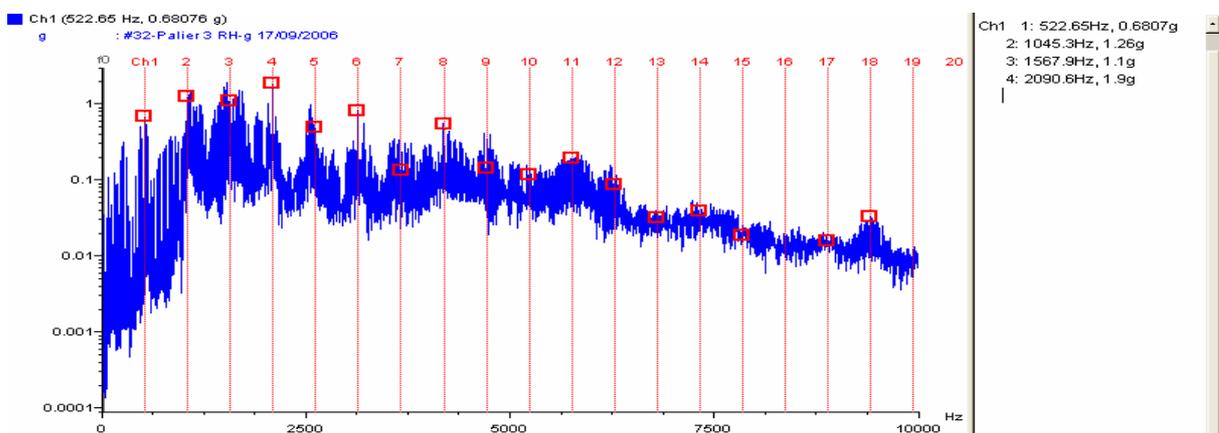
d) Spectre concaténé le 11/12/2006

Fig.V.13: Spectres concaténés en échelle logarithmique (a, b, c, d)

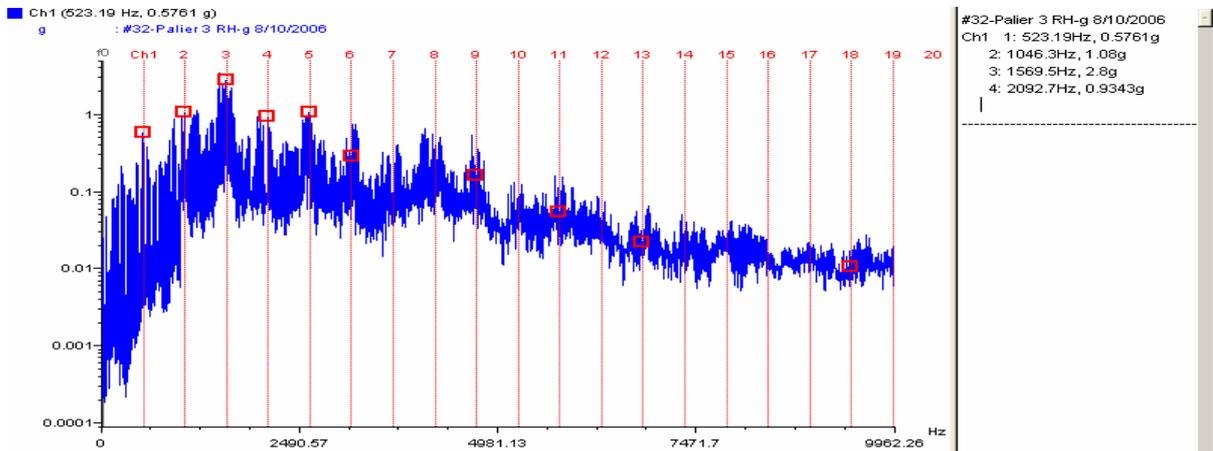
Il est observé que ces spectres traités par la FFT (fig.V.14) manquent de beaucoup de clarté. Ainsi, il est souhaitable d'agrandir ces derniers par un "Zoom", les spectres "Zoomés" sont représentés dans les figures qui suivent :

V.6.1.2.1. Analyse de l'amplitude de la fréquence d'engrènement et ses harmoniques

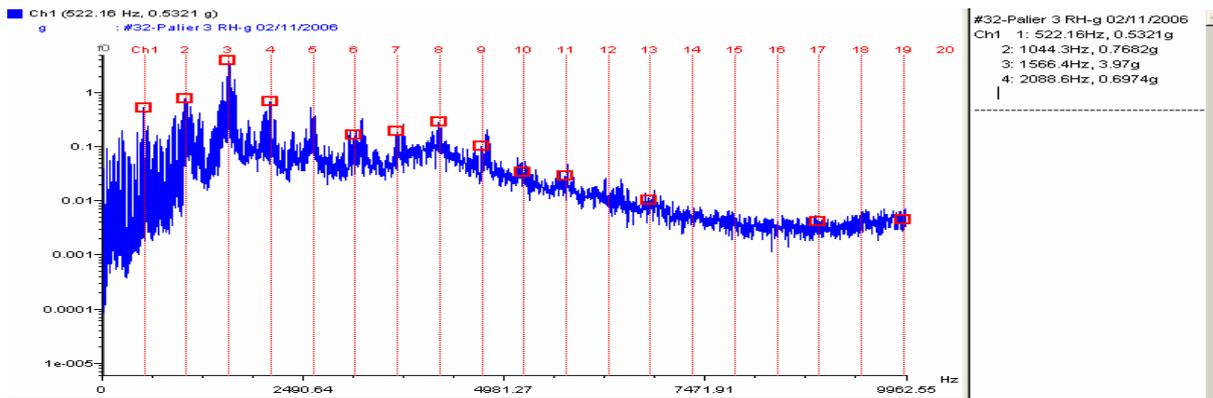
A) Représentation à l'échelle logarithmique des axes des ordonnées



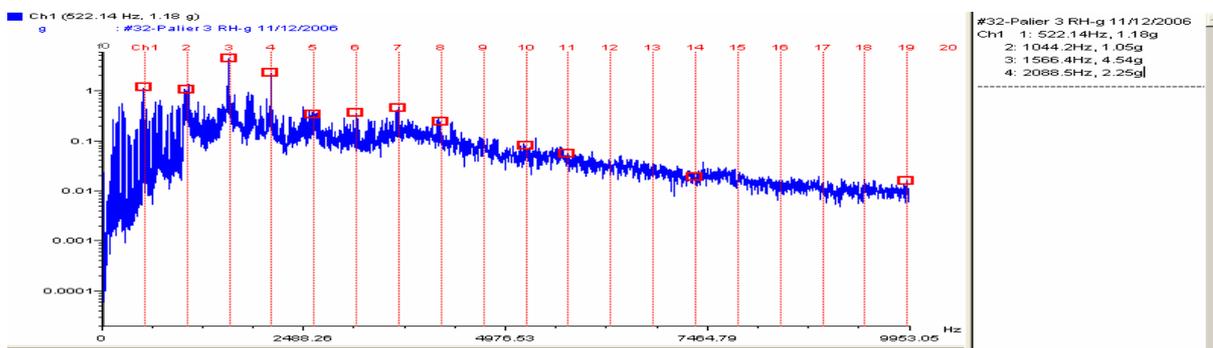
a) Spectre concaténé le 17/9/2006



b) Spectre concaténé le 08/10/2006



c) Spectre concaténé le 02/11/2006



d) Spectre concaténé le 11/12/2006

Fig.V.14: Spectres concaténés en échelle logarithmique après un zoom (a, b, c, d)

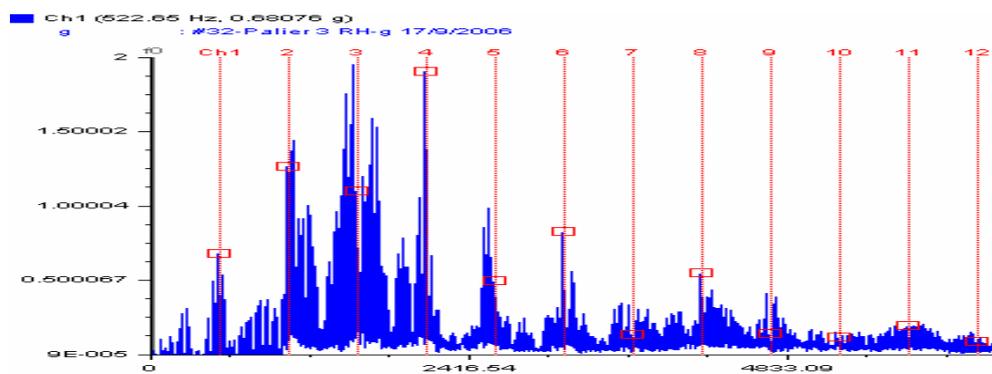
Dans les spectres ci-dessus, l'axe des ordonnées est logarithmique, cette représentation a l'avantage de montrer des composantes de rapport d'amplitude très élevé, et met ainsi en

évidence des familles d'harmoniques ou de bandes latérales de modulations riches en enseignements pour le diagnostic, voir analyse par bandes latérales.

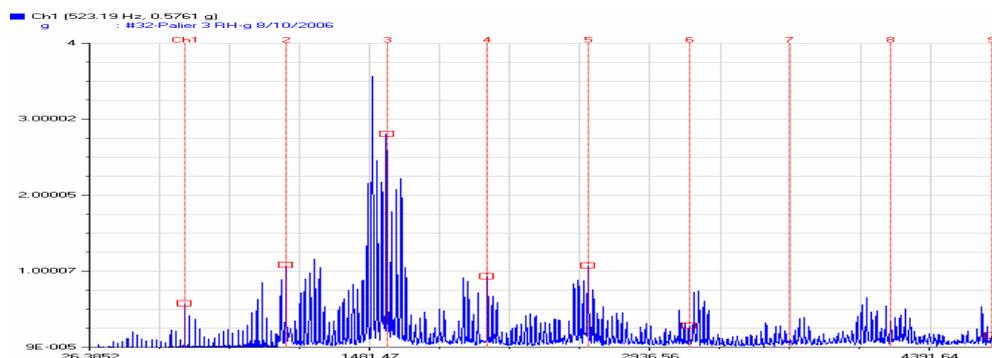
L'existence du peigne de raies est la manifestation spectrale d'un phénomène de chocs périodiques, dont l'origine peut être les chocs internes (une dégradation du roulement, dégradation d'engrènement ou jeux excessifs) [33-35].

Nous constatons aussi clairement une évolution d'énergie dans les spectres ci-dessus respectivement qui conduit à conclure qu'il y a une évolution importante du défaut (fréquence d'engrènement et ces harmoniques)

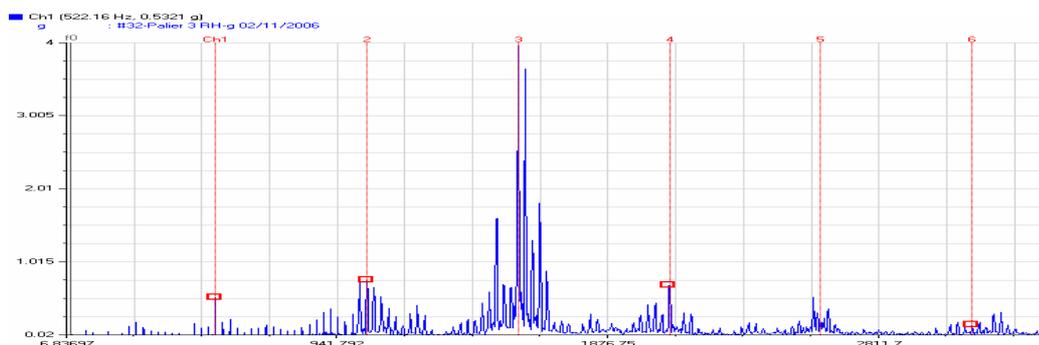
B) Représentation à l'échelle linéaire.



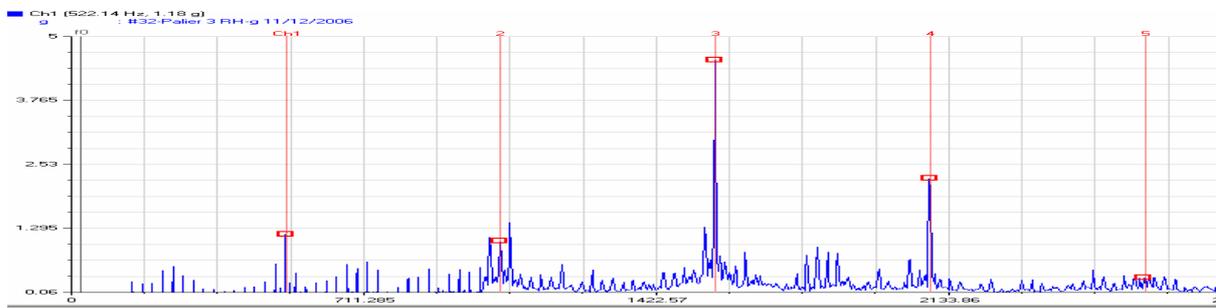
a) Spectre concaténé le 17/09/2006



b) Spectre concaténé le 08/10/2006



c) Spectre concaténé le 02/11/2006



d) Spectre concaténé le 11/12/2006

Fig.V.15: Spectre concaténé en échelle linéaire (a, b, c, d)

Ces quatre spectres ont été représentés sous échelle linéaire en unité physique, cette représentation met en évidence les raies d'amplitude prépondérantes.

Nous voyons clairement que notre défaut se manifeste par une énergie localisée à 3Fe pour les trois dernières mesures, et que son évolution a entraîné l'augmentation des raies caractéristiques. Voir le tableau récapitulatif ci-dessous qui montre l'évolution claire de la 3ème harmonique.

	17/09/2006	8/10/2006	02/11/2006	11/12/2006
PALIER	3RH	3RH	3RH	3RH
3eme harmonique	1.1g	2.8g	3.97g	4.54g

Si nous prenons le spectre de la dernière mesure (11/12/2006), et nous faisons une analyse approfondie :

1- Nous voyons clairement l'existence de plusieurs harmoniques, qui sont révélatrices de défauts induisant des forces de type chocs, tels les jeux ou écaillages sur les pistes d'un roulement ou sur la denture d'un engrenage. Le nombre de ces harmoniques dépend de la «brutalité» du choc, donc de sa brièveté [35].

2- Les amplitudes à la fréquence de 1566.4 Hz et 2088.5 Hz qui coïncide avec la 3ème et la 4ème Harmonique de la fréquence d'engrènement 522.14 Hz, sont prépondérantes (**4.54 g** et **2.25 g**) par rapport à celle de la fréquence d'engrènement **1.18 g**, ce qui met en évidence le **mauvais engrènement du couple pignon – roue dentée**.

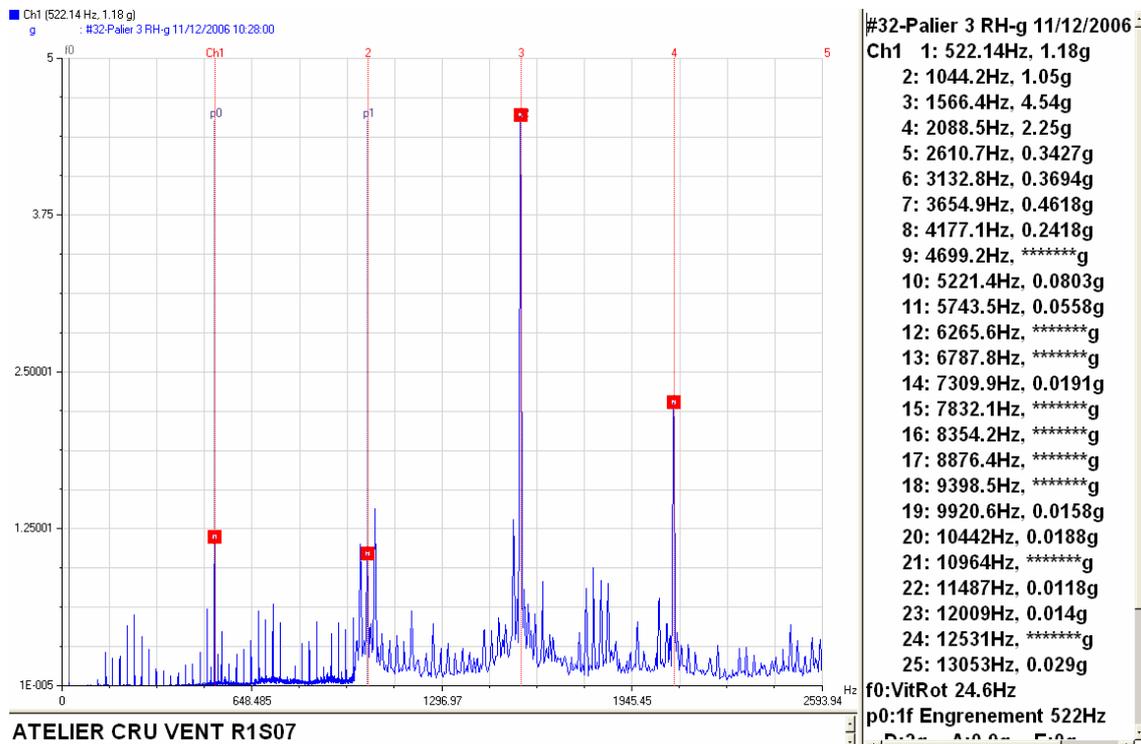


Fig.V.16: la mise en évidence des harmoniques de la fréquence d'engrènement.

D'après la typologie des défauts, une insuffisance de jeux de fond de denture est mise en évidence, vue la prépondérance de la troisième harmonique de la fréquence d'engrènement, provoquant ainsi un problème lors de l'engagement et désengagement de denture.

D'après l'expérience dans le cas des engrenages, l'analyse typique par spectre doit être complétée par une analyse par bandes latérales.

V.6.1.2.2. Analyse par bandes latérales

L'analyse des bandes latérales définit l'origine du problème. Deux graphes sont représentés respectivement sous une échelle logarithmique et une échelle linéaire. Ce choix déjà justifié précédemment, permet d'élargir les champs du diagnostic pour une meilleure vue globale.

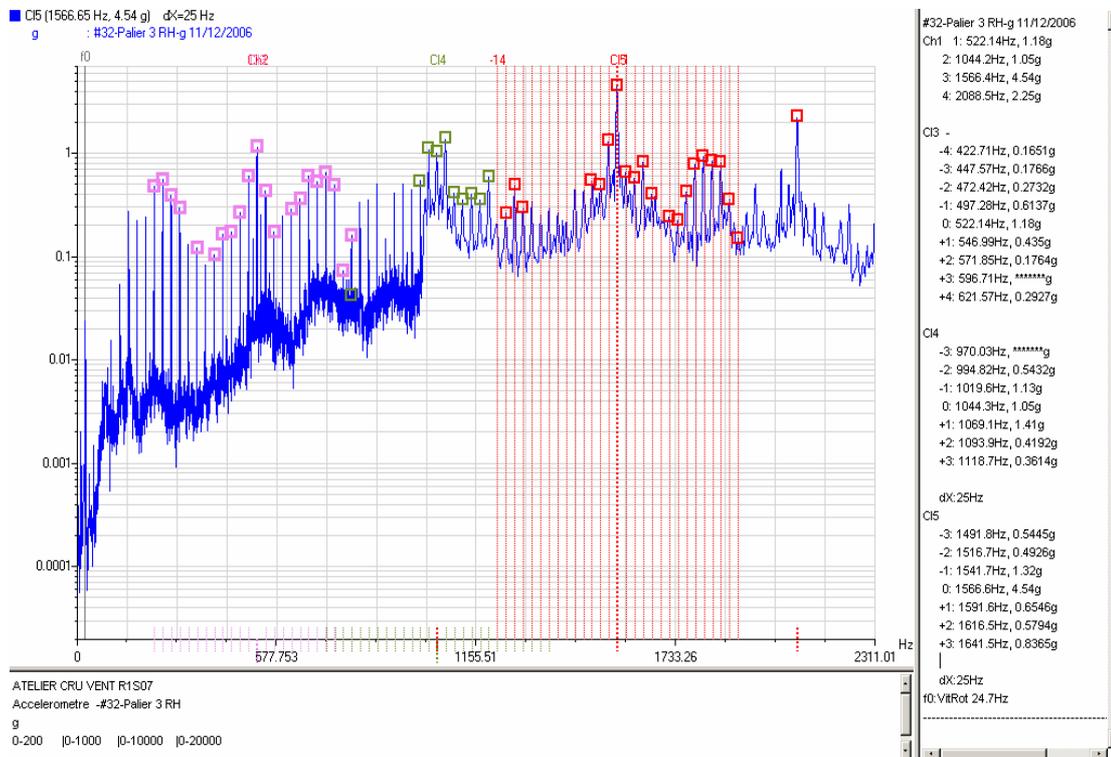


Fig.V.17: la mise en évidence d'un phénomène de modulation autour de la fréquence d'engrènement et la troisième harmonique (échelle logarithmique).

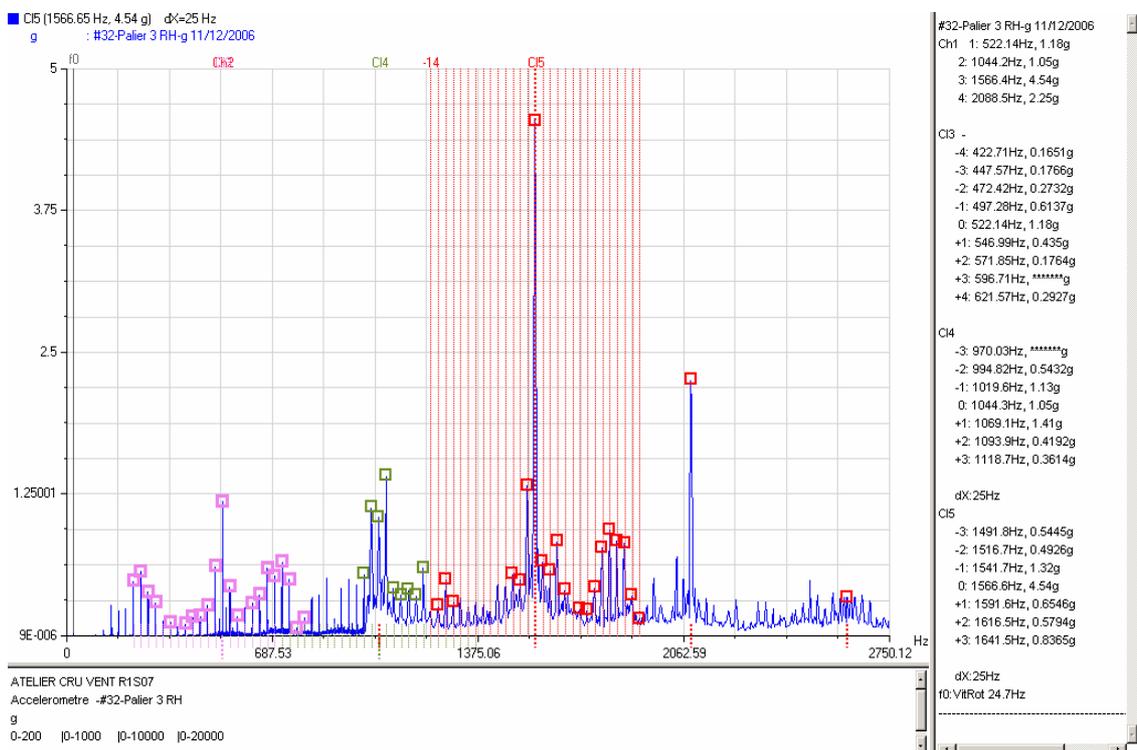


Fig.V.18: la mise en évidence d'un phénomène de modulation autour de la fréquence d'engrènement et la troisième harmonique (échelle linéaire).

Les spectres ci-dessus montrent clairement, plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation de l'arbre PV (24.7Hz) situées de part et d'autre des pics à 22.16Hz, 1044.2Hz et à 1566.4 Hz. L'apparition de ces séries de bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement et de ces harmoniques, reflètent une modulation à la fréquence de rotation de l'arbre, qui met en évidence une déformation de l'arbre (arbre cintré).

Toutefois le niveau de ces bandes latérales reste en évolution continue dans le temps, voir spectre ci-dessous. Les périodes extrêmes du 11/ 12/2006, au 17/09/2006.

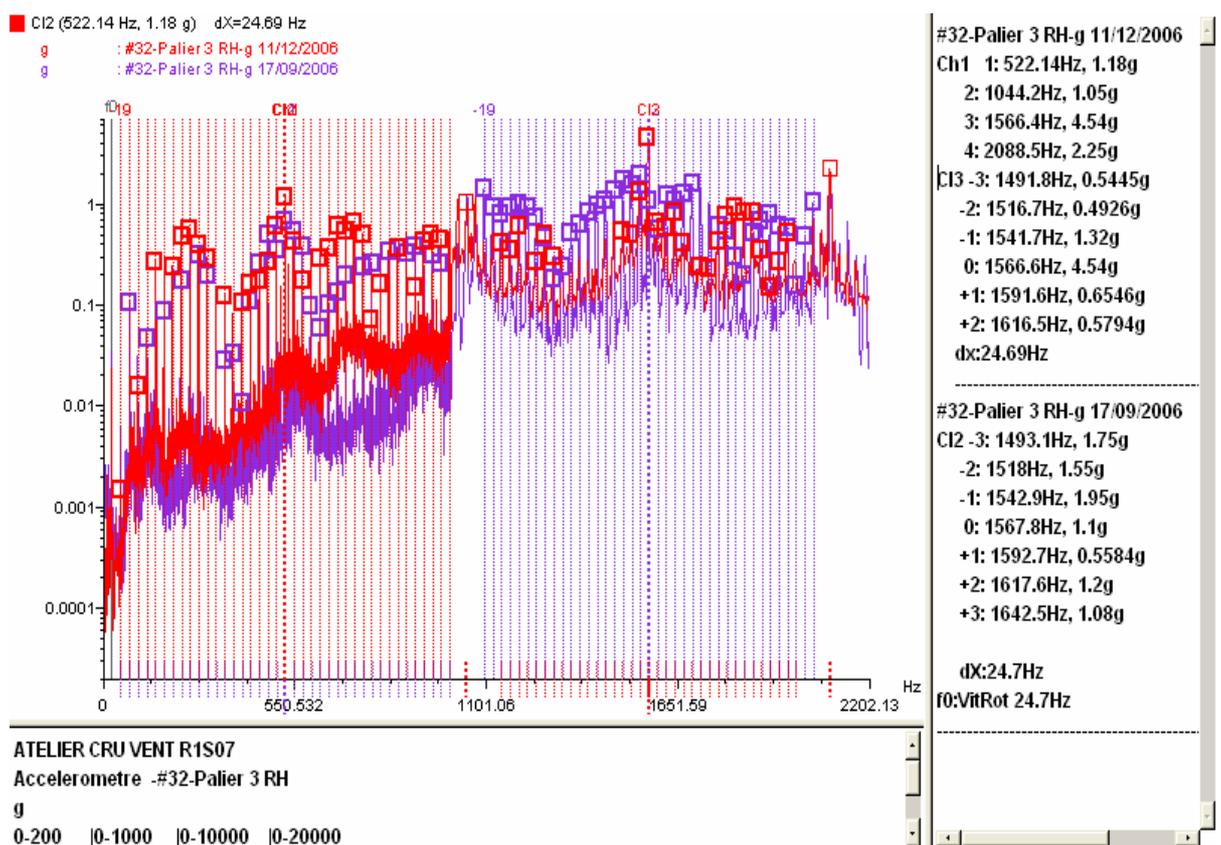


Fig.V.19: Evolution des amplitudes des bandes latérales (échelle logarithmique).

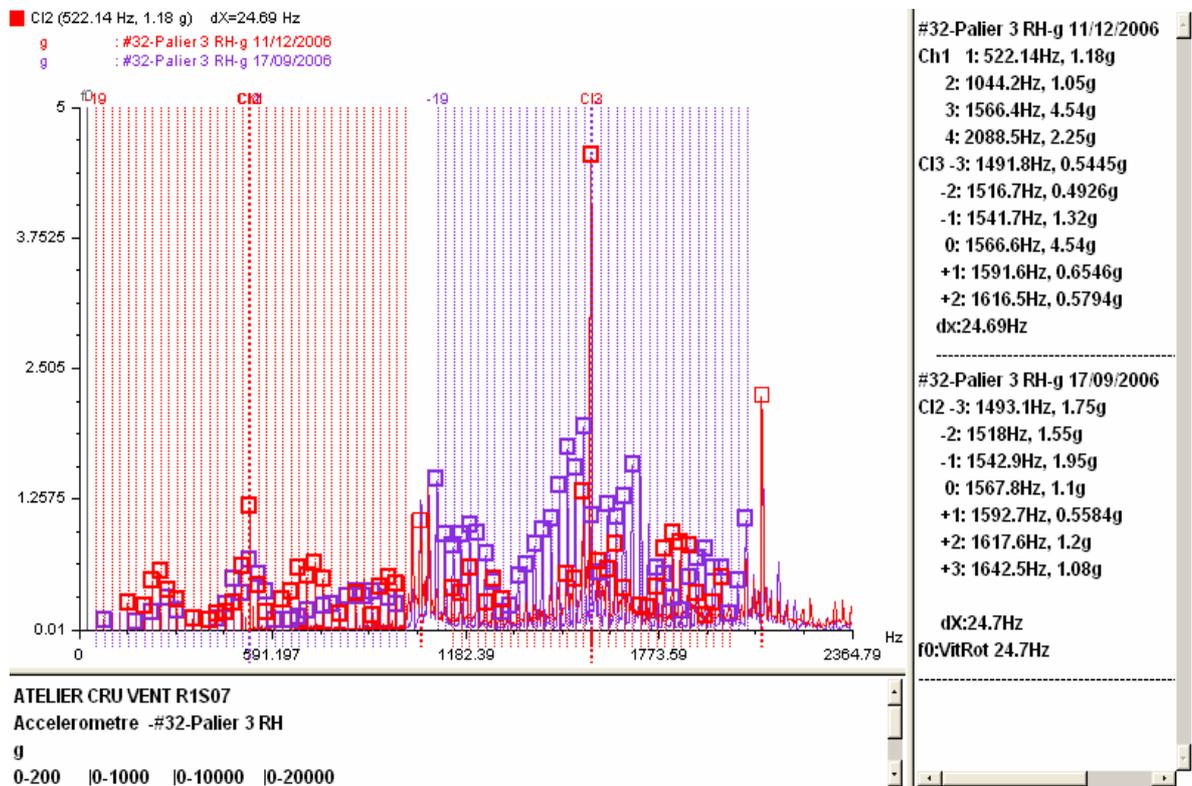
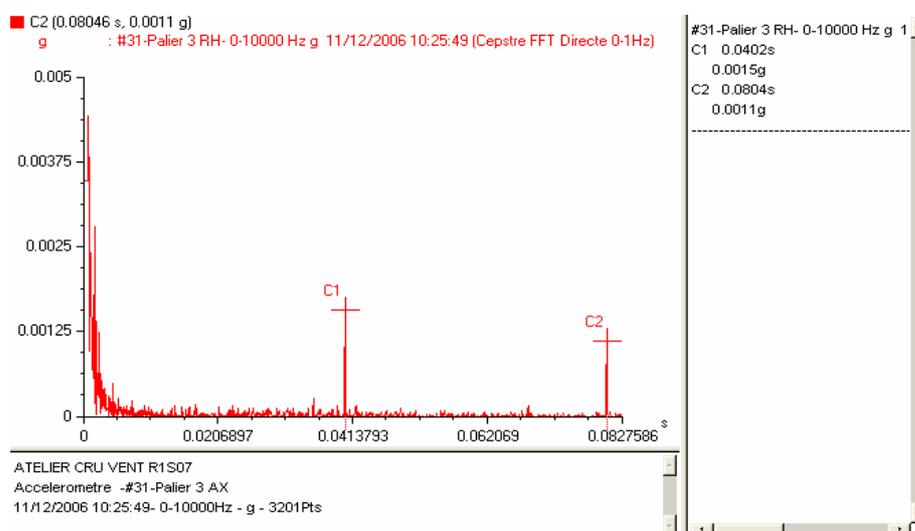


Fig.V.20: Evolution des amplitudes des bandes latérales (échelle linéaire).

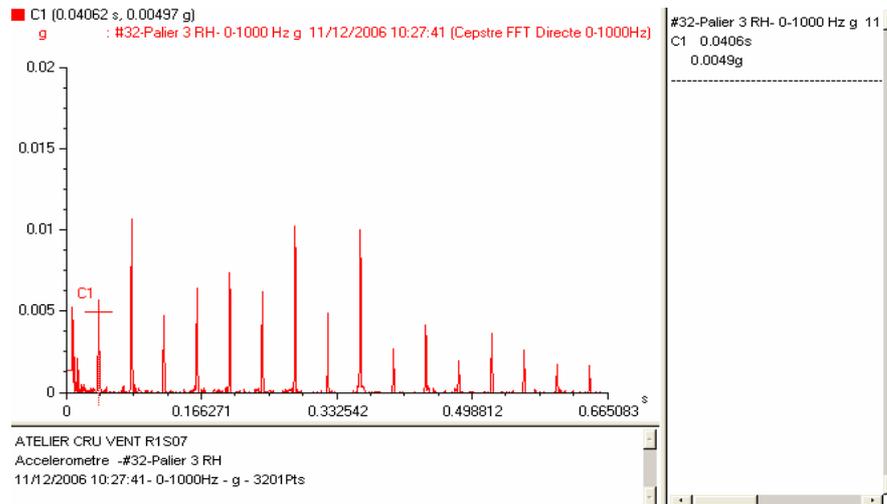
V.6.1.2.3. Analyse par cepstre

Nous avons fait une analyse cepstrale sur une bande de [0-10000 Hz]. Le cepstre de la Fig.V.21 indique clairement une périodicité à la fréquence de rotation qui apparaît par deux rhamoniques, C1 et C2 (de 40.1 ms) qui représente la fréquence du pignon.



b) le cepstre dans la gamme de [1-10000Hz].

Nous avons fait une autre analyse cepstrale, mais cette fois sur une bande de [0-10000 Hz], et nous avons constaté un peigne de raie dont l'intervalle est de 24.7 Hz, qui montre l'existence des chocs qui proviennent du pignon, ces chocs font noyer les défauts de roulement.



a) le cepstre dans la gamme de [1-1000Hz].

Fig.V.21: le cepstre du point 3RH (a, b)

V.6.1.3. Défaut roulement réducteur : palier 3

Défaut roulement réducteur

Désignation	E R	B ext	B int	cage
33210 FAG	178.087 Hz	225.264 Hz	293.436 Hz	10.621 Hz

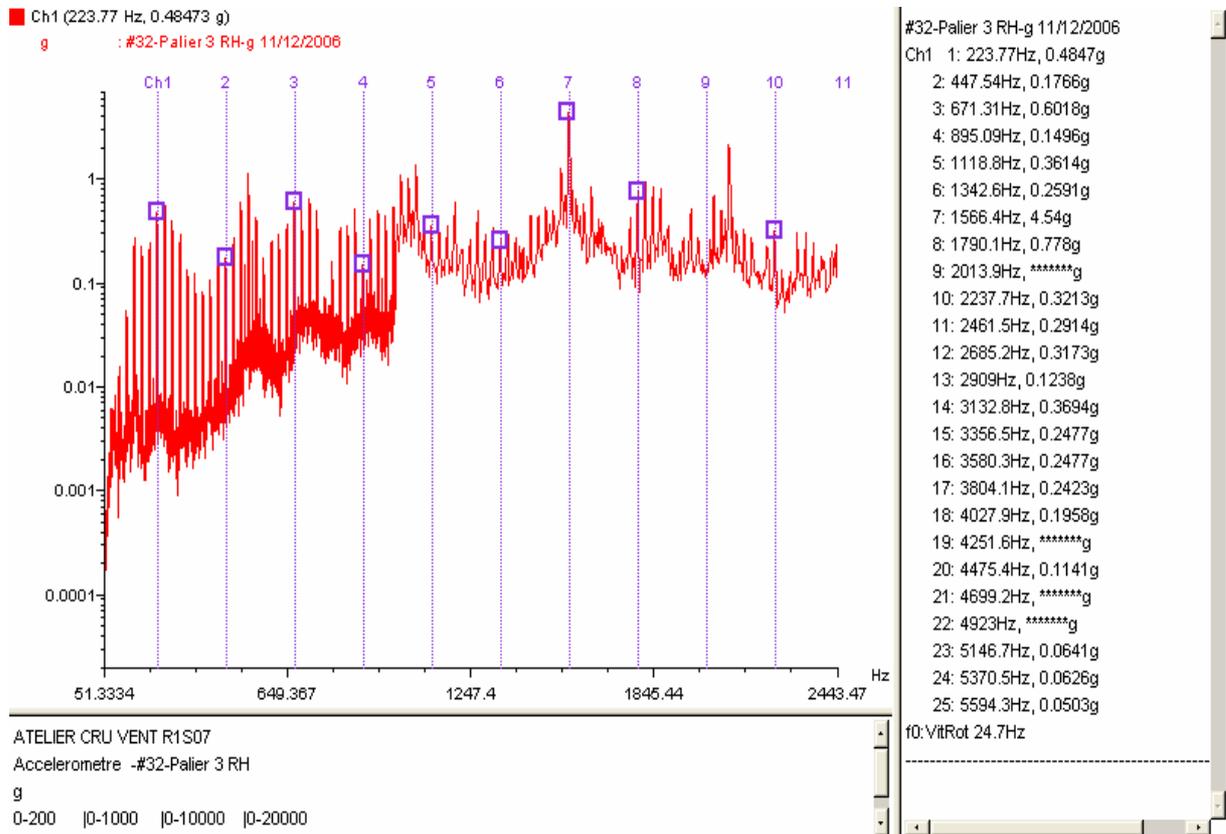


Fig.V.22: Spectre concaténé avec Zoom autour de la fréquence du défaut de la bague extérieure échelle logarithmique.

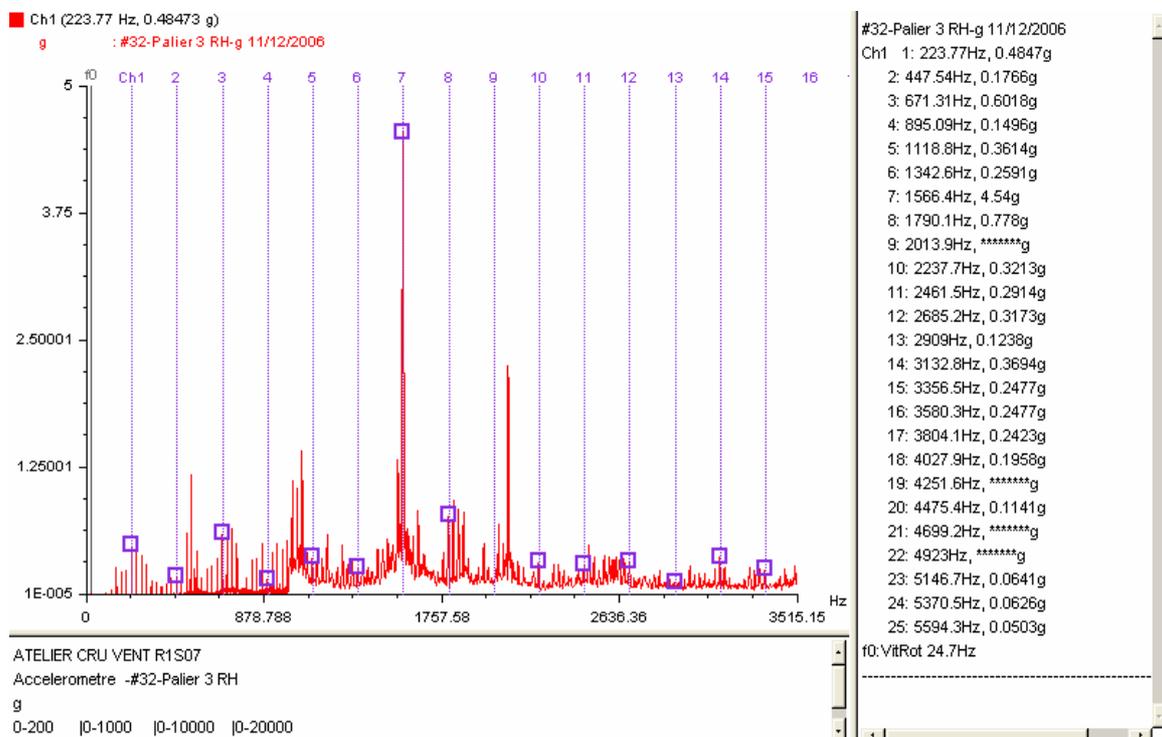


Fig.V.23: Spectre concaténé avec Zoom autour de la fréquence du défaut de la bague extérieure échelle linéaire

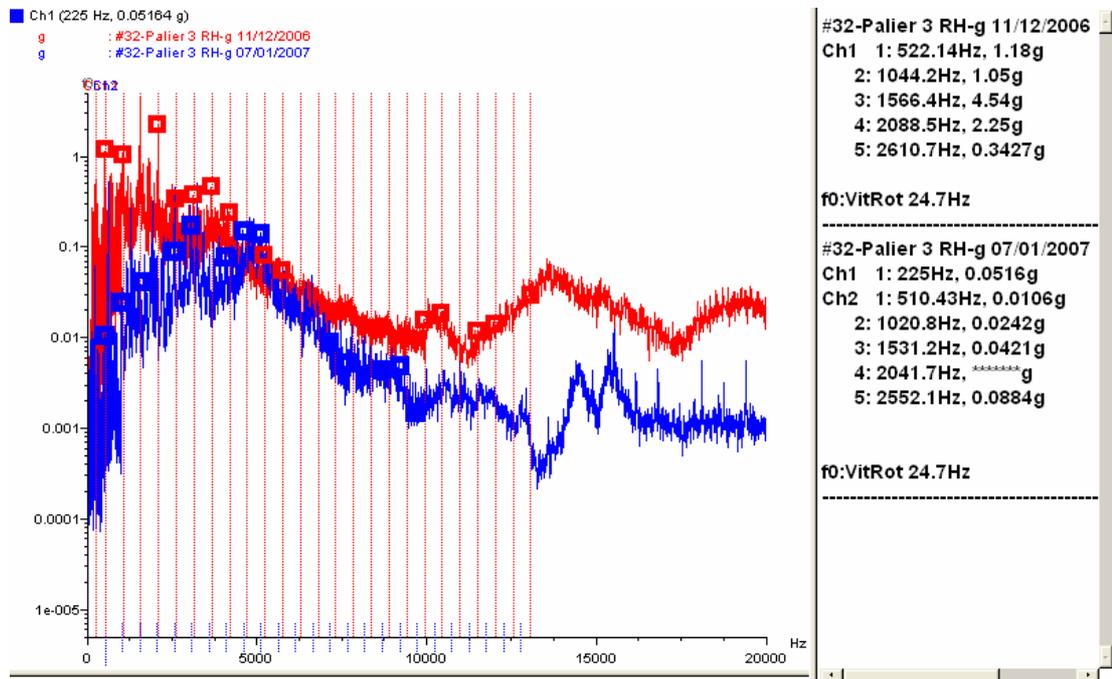


Fig. V.24: Une photo réelle pignon après le démontage.

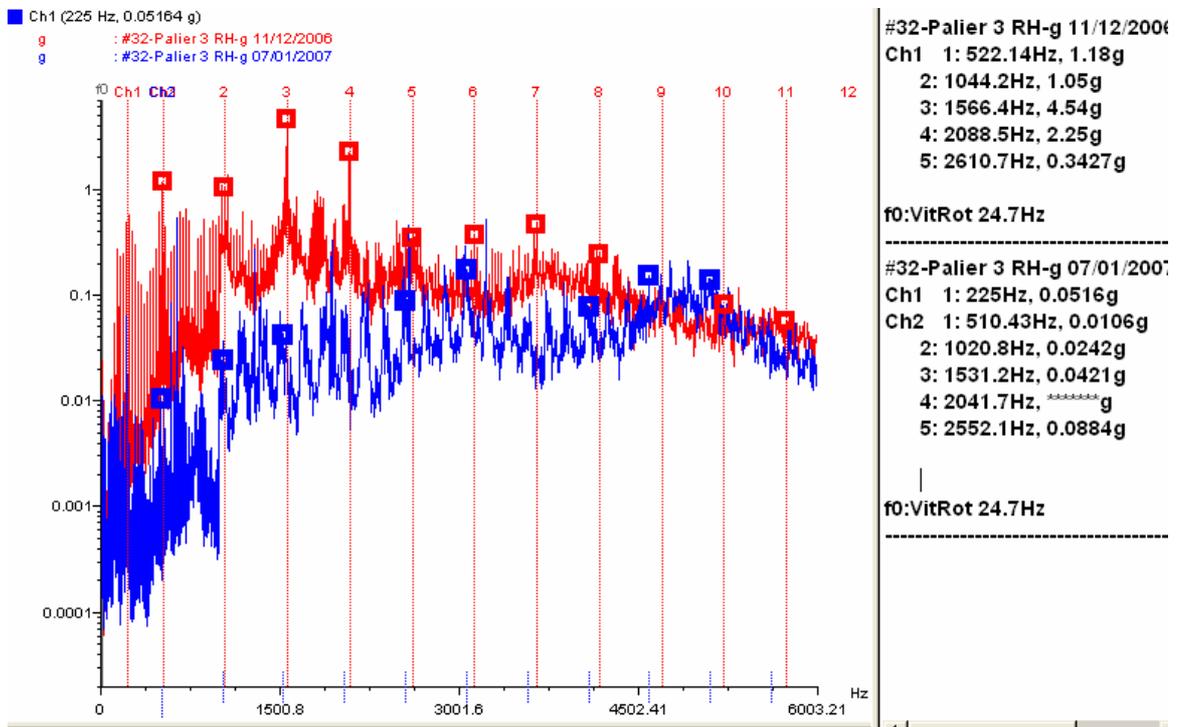


Fig.V.25: Une photo réelle du roulement du réducteur après le démontage.

Après le changement du réducteur nous avons fait une campagne de mesure, et nous avons fait une analyse spectrale qui montre une nette atténuation des vibrations, voir figures.



(a)



(b)

Fig.V.26: comparaison des deux spectres avant et après changement du réducteur Echelle logarithmique (a, b)

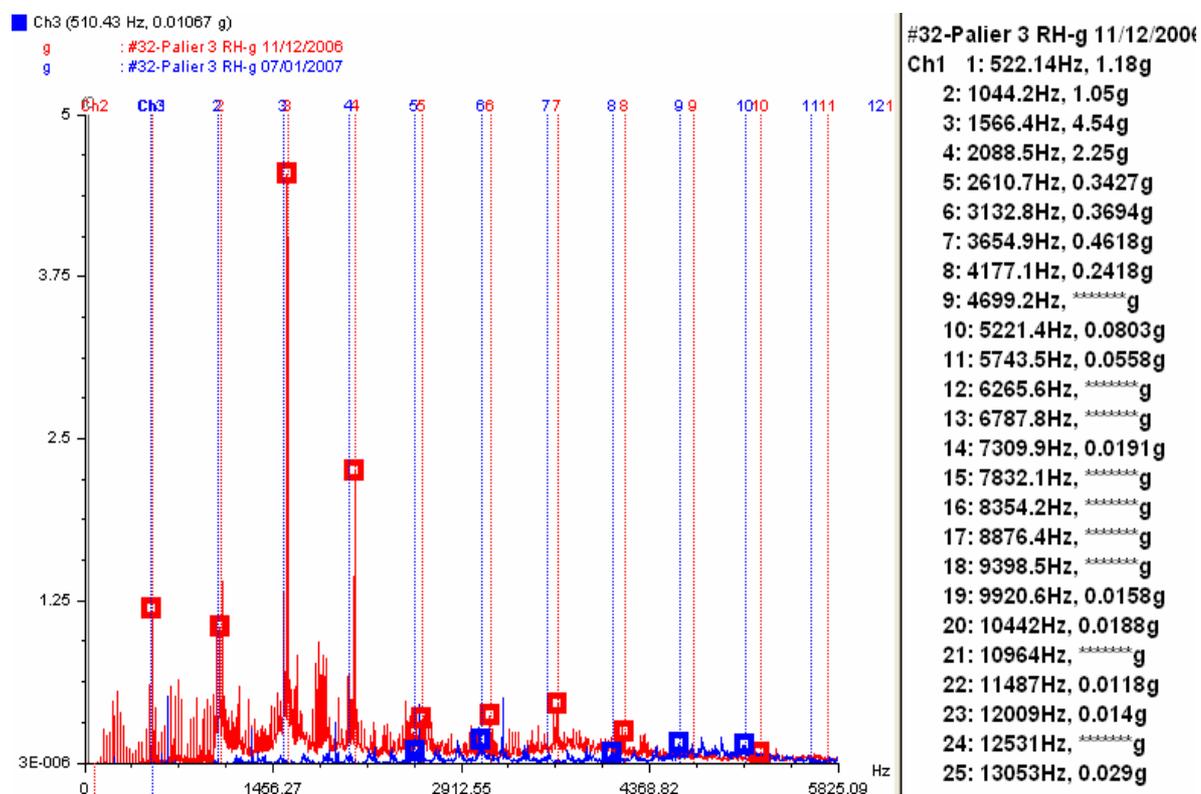


Fig.V.27: Comparaison des deux spectres avant et après changement du réducteur échelle linéaire

V.6.2. Analyse du point 8RH (palier mobile)

	Elément roulant (Hz)	Défaut Bague ext. (Hz)	Défaut bague int. (Hz)	Défaut Cage (Hz)
Ventilateur : Roulement Palier mobile: 22348CC/C3/W33	61.25	72.35	101.73	4.57

V.6.2.1. Analyse du facteur défaut roulement

Dans le cadre de la surveillance vibratoire nous avons fait ressortir les valeurs du DEF comme suivant :

	17/ 09/2006	02/10/2006	02/11/2006	11/12/2006
Avant graissage	8.47	6.77	8.40	9.70
Après graissage	5.8	6.6	7.4	9.1

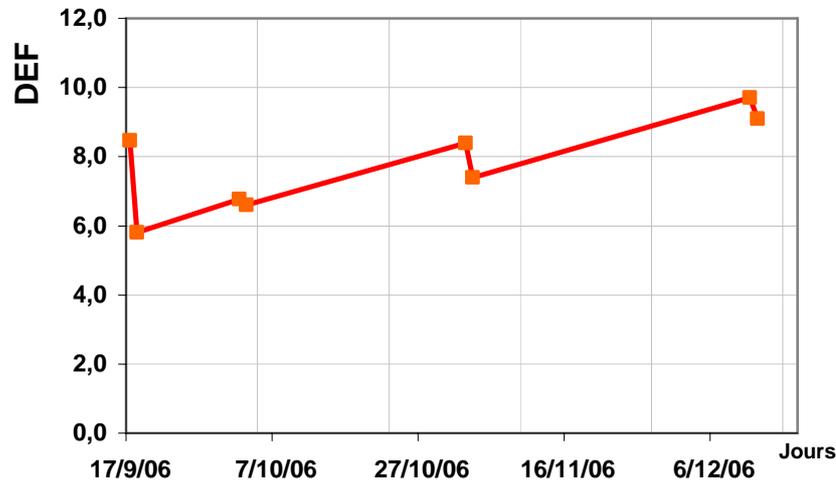


Fig.V.28: la tendance du point 8 RH en DEF

DEF égale à 8.47 (voir spectre énergie), suite à cette élévation importante qui dépasse le seuil de danger fixé d'après les normes, [annexe 3] et pour remédier à ce défaut, nous avons procédé directement en premier lieu à l'opération de graissage, après cela, une autre mesure a été effectuée 24 h après le graissage, et on a constaté une atténuation remarquable du niveau facteur défaut roulement ainsi que de l'énergie en ce point (voir spectres superposés)

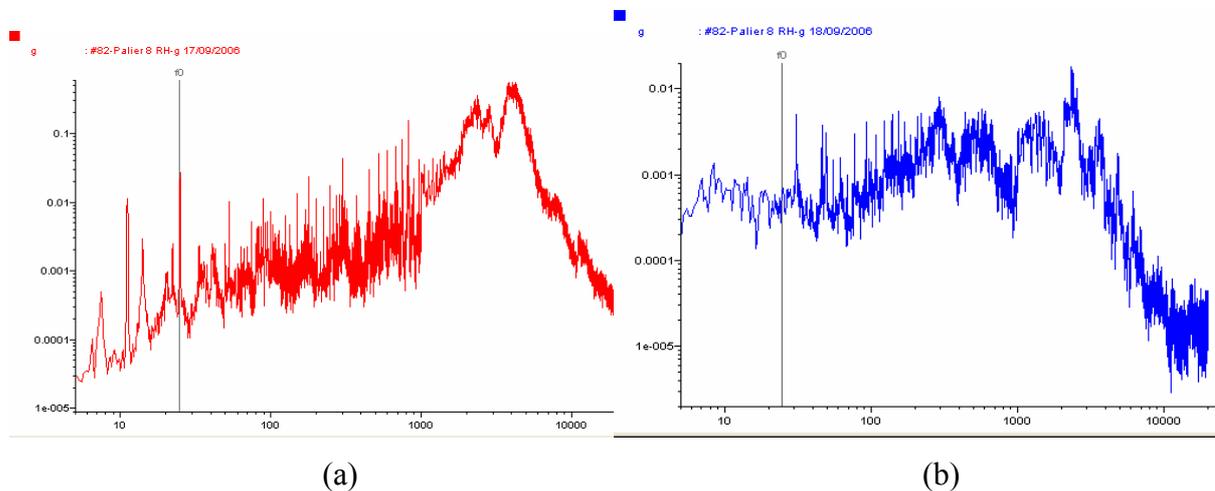
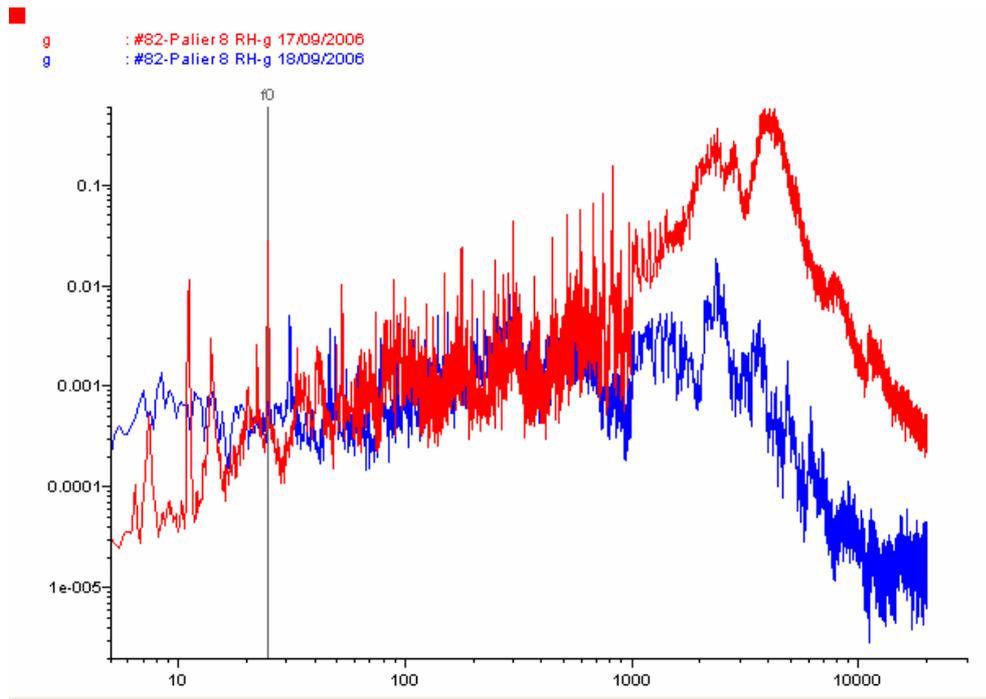


Fig. V.28: Spectres avant et après graissage du point 8RH (a, b)

Afin de mieux faire la comparaison et de mieux voir la différence, nous avons superposé les deux spectres correspondant aux deux phases: avant et après le graissage.



Avec un petit zoom nous voyons l'atténuation en énergie

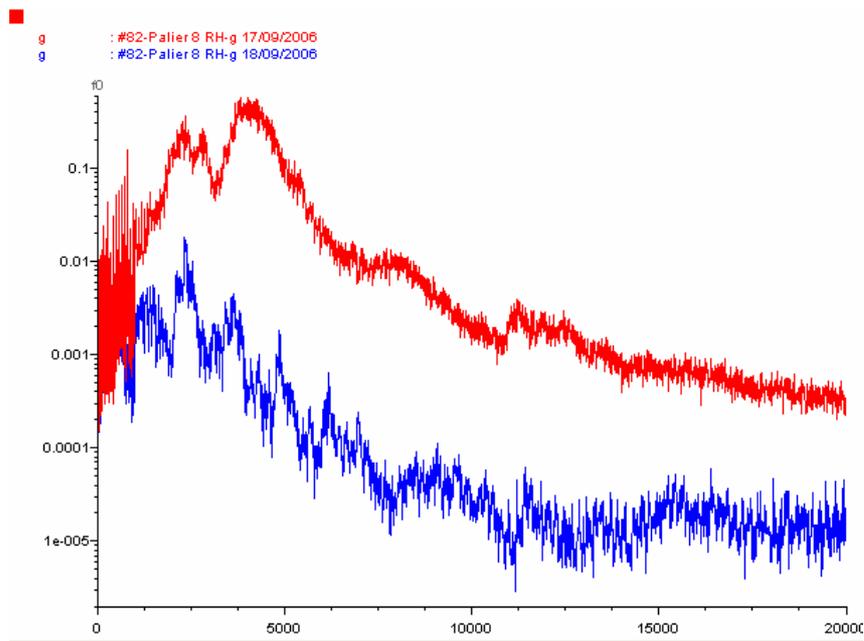
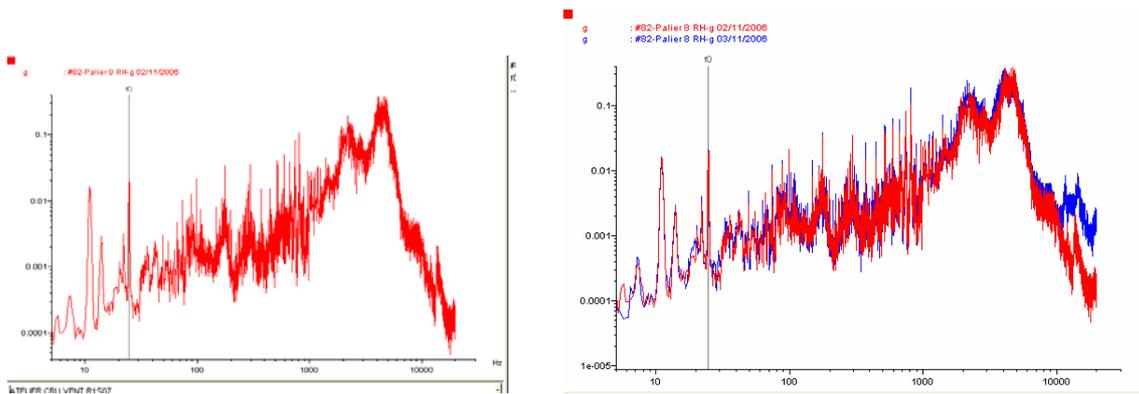


Fig. V.29: Spectres superposés avant et après graissage du point 8RH.

V.6.2.2. Analyse par bandes latérales.

Le 02 /10/2006 nous avons refait la mesure après l'augmentation du DEF, nous avons procédé à un graissage, mais les résultats n'étaient pas satisfaisants, voir spectre et spectre superposé. D'où la nécessité de faire un diagnostic approfondi.



Nous avons fait une analyse spectrale sur les deux échelles logarithmiques et linéaires

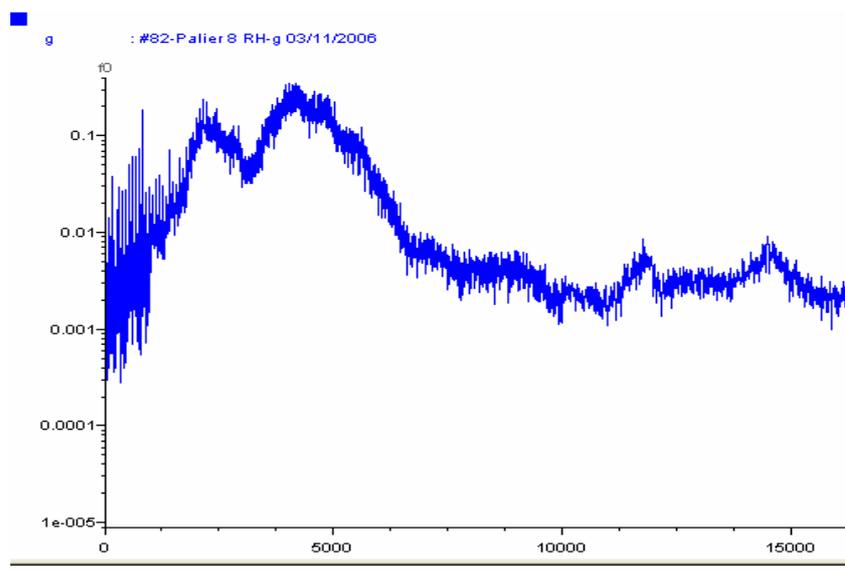
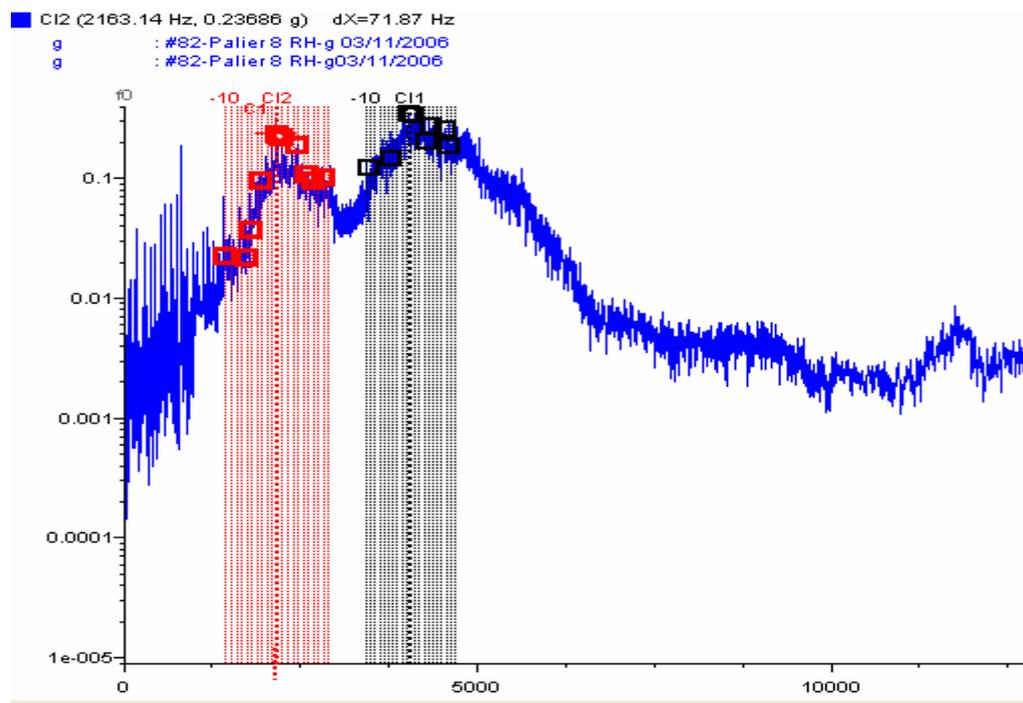
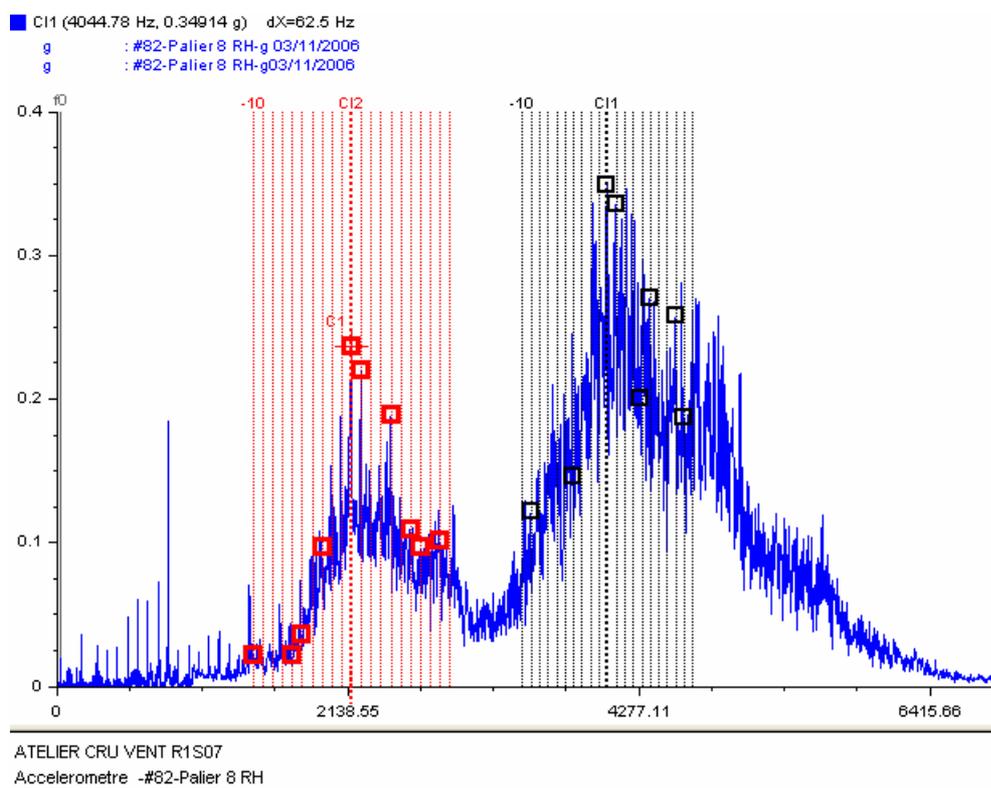


Fig. V.30: Spectre du point 8RH montrant la résonance.

Nous voyons clairement deux résonances à des fréquences de 2163.1 Hz et de 4137.3 Hz, qui incriminent des défauts de roulement, pour identifier leurs origines nous allons faire une analyse des bandes latérales autour de ces deux fréquences (Fig.V.31)



(a)



(b)

Fig. V.31. Spectre du point 8RH mettant en évidence des bandes latérales (a,b)

Le spectre est constitué de deux peignes de raies dont les pas sont de 72.5Hz et 62.5 Hz voir (annexe5), ces deux pas correspondent respectivement aux fréquences des défauts de la bague externe et des éléments roulant du roulement qui appartient au palier libre du ventilateur.

V.6.2.3. Détection de défaut par analyse cepstrale

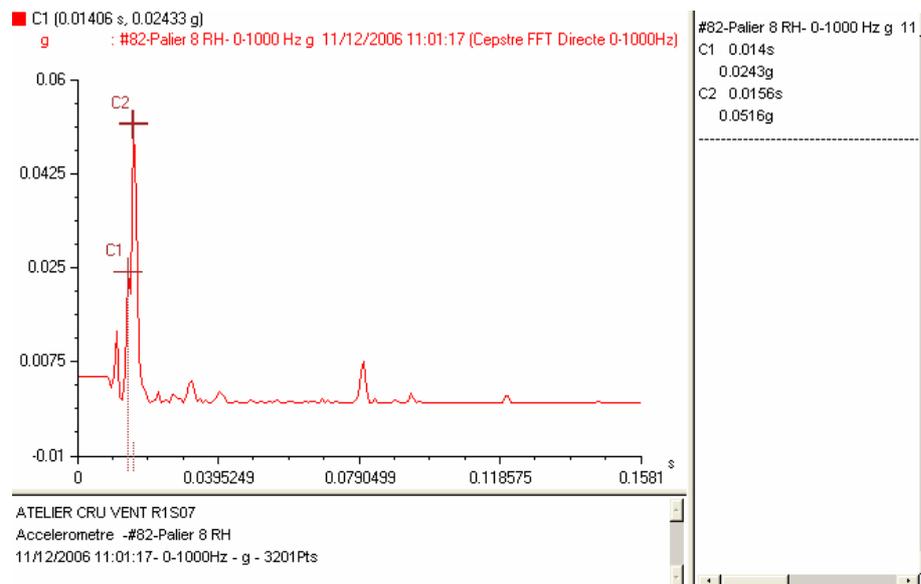
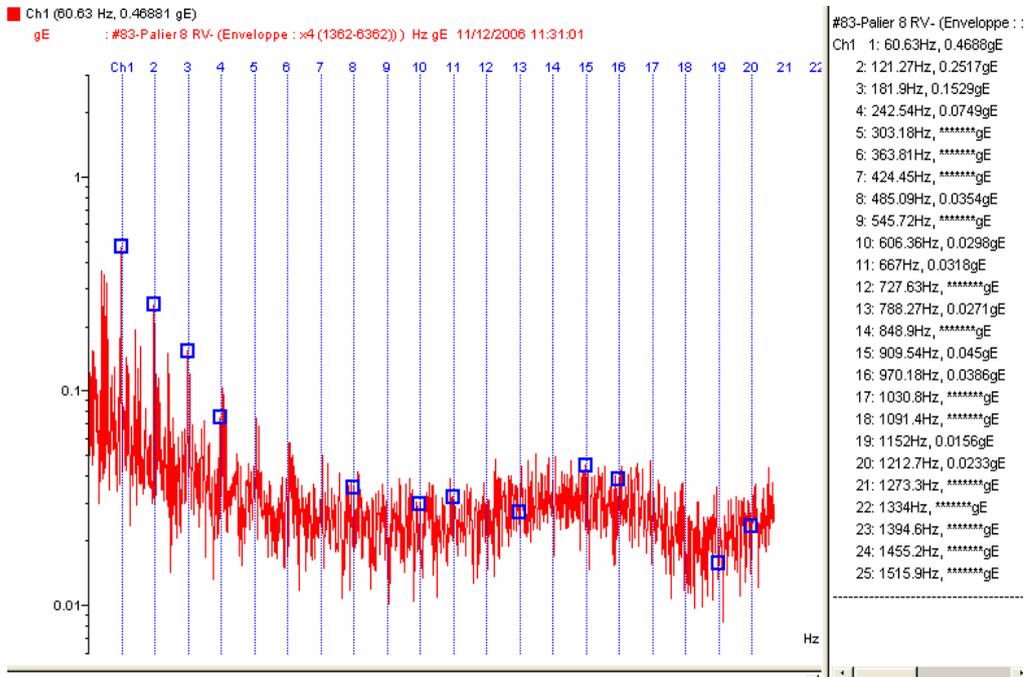


Fig.V.32. Cepstre du point 8 RH.

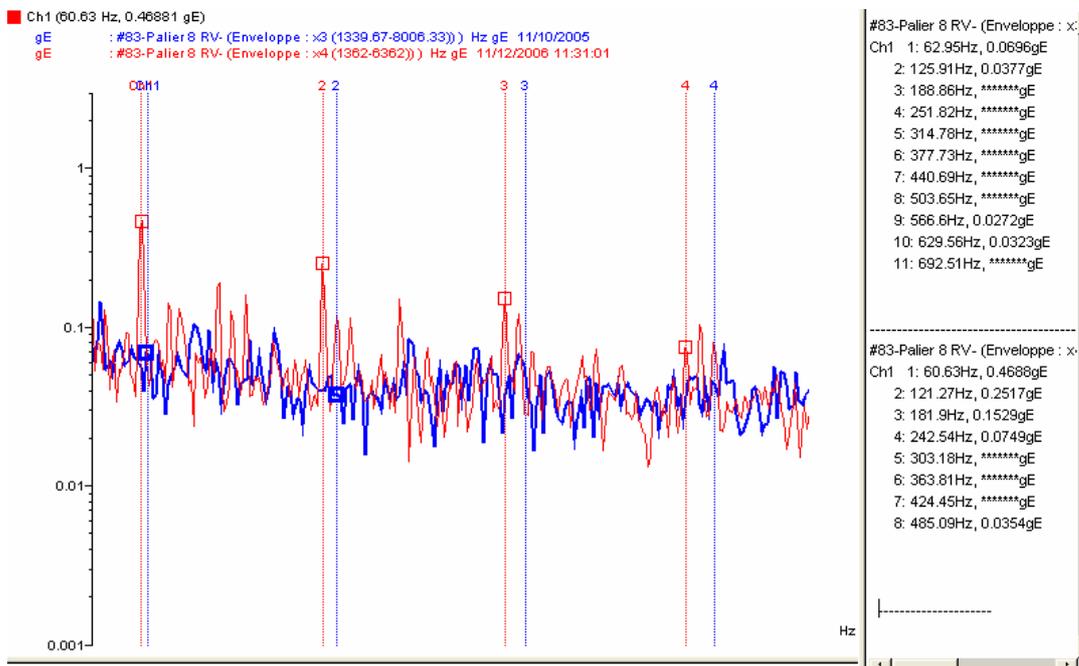
Le cepstre correspondant au spectre de puissance du point 8RH, met en évidence deux quéfrenes (C1 = 14.06ms et C2= 15.6ms) qui indiquent immédiatement que le spectre est constitué de deux peignes de raies dont les pas 72.5Hz et 62.5 Hz correspondent aux fréquences du défaut de bague externe et du défaut élément roulant du roulement qui équipe le palier 8 du ventilateur. On peut donc diagnostiquer la présence d'écaillage affectant la bague extérieure du roulement ainsi que sur les éléments roulants.

V.6.2.4. Détection de défaut par spectre d'enveloppe

Le spectre d'enveloppe est utilisé à la fois pour la détection et le diagnostic, l'existence des pics est révélatrices de défauts, sachant que le spectre d'enveloppe est plat en cas d'absences de défauts.



(a)



(b) superposition des deux spectres

Fig.V33: spectre d'enveloppe du point 8 RV (a, b).

Nous constatons un pic à la fréquence de 60.63 Hz, qui correspond à la fréquence du défaut des éléments roulants du roulement. En comparant ce spectre avec un autre spectre, pris lors de la mise en service de ce roulement, nous constatons la grande évolution du défaut, une augmentation allant de 0.0696gE à 0.4688gE.

V.7. conclusion

L'objectif de ces travaux était de fournir les éléments nécessaires au suivi du comportement vibratoire des équipements. Il s'agissait de définir la démarche du diagnostic.

L'introduction d'anomalies comme les défauts d'engrenage et de roulements modifie la structure des signaux : l'amplitude générale peut augmenter et des modulations d'amplitude et de phase apparaissent, les signaux recueillis ont été observés dans différents domaines d'analyse, domaine spectral, domaine cepstral, et l'analyse d'enveloppe.

Les vibrations contiennent donc toute l'information concernant l'état des organes mécaniques de la machine. La difficulté réside dans l'analyse des signaux vibratoires et dans l'identification des composantes relatives aux éléments à surveiller.

Conclusion générale

Conclusion générale

Par ce modeste travail, j'espère apporter quelques lumières aux problèmes envisagés dans le contexte de mon étude présent. Dans les limites du temps disponible, et de mes connaissances cumulées durant mon stage pratique au sein de la cimenterie SCHB, ainsi que la SME, je me permets d'apporter quelques éléments de réponses à quelques problèmes reliés à la maintenance. Mon premier concerne s'est basé essentiellement sur une présence de terrain, et d'observation. Grâce à la disponibilité de la tutelle d'accueil, j'ai pu élargir mon champ de connaissance, et d'accès à différents niveaux d'informations utiles. Ce qui m'a permis une meilleure implication dans ma tâche d'investigation. La SCHB de part son importance stratégique dans le secteur de la construction civile et industrielle, est toujours en quête d'amélioration de ses performances de compétitivité, aussi bien dans le contexte de la production que de la sécurité.

Financièrement, les programmes planifiés d'entretien ne sont plus viables; personne ne peut plus se permettre de prendre le risque d'une faiblesse non détectée devenant une défaillance majeure. L'entretien préventif quant à lui est aussi faillible; il engage des frais de remplacement non nécessaires et s'accompagne du risque d'introduire des faiblesses là où il n'y en avait pas, l'entretien conditionnel prévisionnel est la solution.

De ce fait, une maintenance conditionnelle gérée par un système expert "On-line" est donc mise en place depuis 2005 dans la cimenterie SCHB, afin de parer aux problèmes de perte de productions générées par les pannes souvent imprévues, de lourdes conséquences tant sur le plan de la sécurité que de l'économie. Nous avons constaté quelques insuffisances concernant la maîtrise et l'exploitation des moyens disponibles, notamment, le système expert qui offre des options d'analyse et d'investigation efficaces et utiles. Ces insuffisances s'expliquent essentiellement non pas par manque de compétence mais fort bien par manque de formation. Nous préconisons dans ce sens un double remède, qui consiste à prévoir une formation spécifique aux outils de maintenance (Logiciel), d'autre part une attention particulière afin d'améliorer les connaissances pratiques concernant le dépistage et le diagnostic des machines tournantes (maîtrise de la base de données disponible, manque de savoir pour l'utilisation du VIBSCANNER pour l'équilibrage, onde de chocs...). Le tribut de l'expérience constitue un acquit incontournable, cependant, insuffisant devant les défis de la concurrence et des enjeux contemporains. D'autre part les interférences apportées par les mutations du personnel de

maintenance néophyte, et a peigné initié dans sa tâche technique, constitue des pertes d'expériences et une obstruction à la relève indispensable, pour la continuité et la bonne démarche de surveillance vibratoire On-line et Off-line. Vu le gabarit du parc des machines dites stratégiques, et d'importance, nous estimons en fait que le personnel chargé de la surveillance vibratoire, doit être élargi à un nombre proportionnel. Par ailleurs, dans les limites de nos connaissances, et de notre observation au sein de la cellule vibratoire, l'absence de l'analyse **AMDEC**, doit être activée impérativement pour la mise en place d'une maintenance conditionnelle fiable (voir Chap. II).

L'indicateur scalaire utilisé par le système SCV est le NGvit, mesuré dans la bande fréquentielle [1-1000Hz], cette technique de simple utilisation, s'avère mal adaptée à la détection de défauts à un stade précoce. Car elle présente de nombreux écueils: l'effet de masque qui peut rendre dans certain cas cet indicateur insensible à l'apparition d'un défaut, et par sa sensibilité à une gamme de défauts très étendue, rend impossible la définition d'un seuil unique réaliste, de plus la sensibilité différente des trois grandeurs cinématiques est négligée.

Nous avons vu dans le chapitre IV qu'il y a plusieurs outils de diagnostic, le cepstre constitue un outil puissant disponible dans le système expert "DIVA", pour l'interprétation des spectres, il constitue une aide efficace en permettant une identification rapide de structures périodiques spectrales souvent complexes. Mais malheureusement il est paradoxalement encore méconnu des mécaniciens.

Enfin, on peut dire que malgré l'intérêt porté par la maintenance prédictive dans le domaine de la surveillance des machines tournantes, ses applications restent rares. La principale explication réside dans un manque de formation et d'encadrement technique.

Donc pour réaliser un diagnostic fiable ou définir des indicateurs de surveillance pertinents, il ne suffit pas d'avoir un matériel adapté à ce type d'investigation, il faut aussi avoir les aptitudes nécessaires pour le mettre en oeuvre.

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 et du diagnostic.

Références bibliographiques

1. **Eugène Désiré EFAGA**_ Décembre 2004, Analyse des données du retour d'expérience pour l'organisation de la maintenance des équipements de production des PME/PMI dans le cadre de la MBF (maintenance basée sur la fiabilité), thèse de doctorat, ULP-UY I N° : LEPSI-EA3118
2. **CHARLES CYR_MARS** 2004, développement d'algorithmes de détection de défauts pour la maintenance prédictive de générateurs hydroélectriques, thèse de doctorat, Faculté des sciences et de génie université Laval, Québec.
3. **B. Iung, E. Levrat, E. Thomas**, Odds Algorithm'-based Opportunistic Maintenance Task Execution for Preserving Product Conditions, *Annals of the CIRP* Vol. 56/1/2007.
4. **Ales Belsak, Joze Flaker**, Detecting cracks in the tooth root of gears, *Engineering Failure Analysis* 14 (2007) 1466–1475.
5. **Claire BRENEUR**_2002, Éléments de maintenance préventive de machines tournantes dans le cas de défauts combinés d'engrenages et de roulements, thèse de doctorat, école doctorale des sciences pour l'ingénieur de lyon.
6. **Hadjer SAADI**, Caractérisation et identification des défauts de transmission par engrenage par une analyse basée sur une approche expérimentale. 6^{ème} Journées de Mécanique de l'Ecole Militaire Polytechnique 15~16 Avril 2008, Bordj El Bahri, Alger.
7. **Sadettin Orhan, Nizami Akturk , Veli Celik** , Vibration Monitoring for Defect Diagnosis of Rolling element bearings as a predictive maintenance tool: Comprehensive case studies, *NDT&E International* 39 (2006) 293–298.
8. **J.P. Dron, F. Bolaers, I. Rasolofondraibe**, Improvement of the sensitivity of the scalar indicators (crest factor, kurtosis) using a de-noising method by spectral subtraction: application to the detection of defects in ball bearings, *Journal of Sound and Vibration* 270 (2004) 61–73.
9. **Abdullah M. Al-Ghamda, David Mbab**, A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size, *Mechanical Systems and Signal Processing* 20 (2006) 1537–1571
10. **J. Antoni**, Cyclic spectral analysis of rolling-element bearing signals: Facts and fictions *Journal of Sound and Vibration* 304 (2007) 497–529
11. **F. Bogard, K. Debray, Y.Q. Guo**, Determination of sensor positions for predictive maintenance of revolving machines, *International Journal of Solids and Structures* 39 (2002) 3159–3173
12. **Mû-Saeed Safiuadeh**_1999. Diagnostic des machines dans le plan temps-fréquence, thèse de doctorat, Ecole polytechnique de Montréal.

13. **D. Khaled Belmadh** _2006, Technique of maintenance, 2ème édition, Université Pierre and Marie Curie- Paris VI.
14. **Gilles DUCHEMIN**, Technique de l'ingénieur BM 4 188, Maintenance des machines et des moteurs.
15. **Jean-Marie Auberville** _2004, Maintenance industrielle.
16. **Alain Boulenger, christian Pachaud**, Dunod _1998, Diagnostic vibratoire en maintenance préventive.
17. **Bernard MECHIN**, Technique de l'ingénieur MT 9 280, Introduction aux méthodes de maintenance.
18. **Yves LAVINA**_ Dunod, paris, 2005, Amélioration continue en maintenance.
19. **Jean Héng** DUNOD, paris_ 2002, Pratique de la maintenance préventive.
20. **François Monchy** – DUNOD_ 2000, Maintenance méthodes et organisations.
21. **Jacques MOREL**, Technique de l'ingénieur_R6 100, Surveillance vibratoire et maintenance prédictive.
22. **Alain Boulenger, Christian Pachaud**, Dunod,_2004, Analyse vibratoire en maintenance.
23. **Marie-Line Zani** _ Septembre 2003, la surveillance des machines tournantes, mesure 757
24. Document **Stell diagnostic** _ 2002, maintenance et vibration.
25. **Antoine Tahan**, ing, **Camilo Valderrama**, ing. Stagiaire **Hernando .Duran**, ing. Stagiaire 1ère édition _ octobre 1998 Manuel : TPM - Total Productive Maintenance.
26. **HÉDI KAFFEL**_ octobre 2001, La maintenance distribuée, concept évaluation et mise en œuvre, thèse de doctorat, faculté des sciences et de génie université Laval Québec
27. **Anders Sundberg** , Management aspects on Condition Based Maintenance – the new opportunity for maritime industry, Paper presented at the 9TH International Conference on Marine Engineering Systems ,19-21 May 2003
28. **BRÜEL KJÆR**_ Rév. C - Décembre 2001, les analyses vibratoires.
29. **Alain Boulenger et Christian pachaud**_1998, Surveillance des machines par analyse des vibrations.
30. Document **OMNITREND**.
31. **CHAIB Rachid**_2004, la maintenance industrielle, université de Mentouri de constantine.

32. Séminaire organisé à l'hôtel AURASSI à ALGER par Le Centre de Perfectionnement de l'Entreprise SONATRACH en collaboration avec le groupe dBVip. Du 25 Au 27 juin 2001, La Maintenance Prédictive des Machines Tournantes par Surveillance Vibratoire
33. Document **01db Stell** _ Février 2001, Débuter la mesure vibratoire.
34. **Louis Etienne DENAUD**_2006, Analyses vibratoires et acoustiques du déroulage, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.
35. **ALAIN BOULENGER** Maintenance conditionnelle par analyse des vibrations Technique de l'ingénieur. MT 9 285.
36. **DYNAE**. Les indicateurs d'une surveillance fiable,
37. **BRÜEL KJÆR**_ 2002, Introduction à la détection des défauts.
38. **Ch. Pachaud** et **A boulenger**, Mai 1994, surveillez mieux vos machines en démodulant, AIF services, mesures 665
39. **Marie-Line Zani**_ Avril 2003, les roulements, des composants à surveiller de près, mesure 754
40. **Ch. Pachaud** et **A boulenger**, Février 1993, diagnostiquez vos vibrations grâce au cepstre, mesure 652, AIF services.

Annexes

Annexe 1

Analyse AMDEC

Dans les organes spécifiques et mal connus, on doit faire une analyse de type AMDEC (analyse des modes de défaillances et de leurs criticités) en utilisant la matrice à trois criticités suivante (tableau suivant)

Gravité G : impact des défaillances sur le produit ou l'outil de production			
1	Sans dommage : défaillance mineure ne provoquant pas d'arrêt de production, et aucune dégradation notable du matériel	3	Important: défaillance provoquant un arrêt significatif, et nécessitant une intervention importante
2	Moyenne : défaillance provoquant un arrêt de production, et nécessitant une petite intervention	4	Catastrophique : défaillance provoquant un arrêt impliquant des problèmes graves
Fréquence d'occurrence O : probabilité d'apparition d'une cause ou d'une défaillance			
1	Exceptionnelle : la possibilité d'une défaillance est pratiquement inexistante	3	Certaine : il y a eu traditionnellement des défaillances dans le passé
2	Rare : une défaillance occasionnelle s'est déjà produite ou pourrait se produire	4	Très fréquente : il est presque certain que la défaillance se produira souvent
Non-détection D : Probabilité de la non-perception de l'existence d'une cause ou d'une défaillance			
1	Signes avant-coureurs : l'opérateur pourra détecter facilement la défaillance	3	Aucun signe : la recherche de la défaillance n'est pas facile
2	Peu de signes : la défaillance est décelable avec une certaine recherche		Expertise nécessaire : la défaillance n'est pas décelable ou encore sa localisation nécessite une expertise approfondie

Tableau – analyse des modes de défaillances et de leur criticité. [19]

Annexe 2

Critères d'évaluation de la sévérité vibratoire

- A Bon
- B Acceptable pour un service de longue durée sans restriction
- C À peine tolérable pour un fonctionnement de courte durée
- D Vibrations suffisamment importantes pour endommager la machine à court terme.

Critère 1 : amplitude des vibrations (cf. tableau B)

Critère 2 : Variation d'amplitude

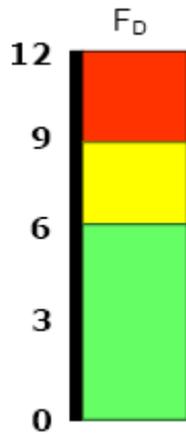
Ce critère fournit une évaluation de la variation d'amplitude des vibrations à partir d'une valeur de référence préalablement établie.

Tableau B – Amplitude des vibrations selon ISO 10816								
v_{eff} (mm/s)	Types de machines							
	15 < P < 300 kW (1) 160 < H < 315 mm (2)		0,3 < P < 50 MW (1) H > 315 mm (2)		Pompes P > 15 kW		Motopompes P > 15 kW	
	Rigide	Souple	Rigide	Souple	Rigide	Souple	Rigide	Souple
0,0 à 1,4	A	A	A	A	A	A	A	A
1,4 à 2,3	B	A	A	A	A	A	B	A
2,3 à 2,8	B	B	B	A	B	A	B	B
2,8 à 3,5	C	B	B	A	B	A	C	B
3,5 à 4,5	C	B	B	B	B	B	C	B
4,5 à 7,1	D	C	C	B	C	B	D	C
7,1 à 11,0	D	D	D	C	D	C	D	D
11,0 à	D	D	D	D	D	D	D	D

(1) P puissance des machines industrielles autres que les pompes ou motopompes
(2) H hauteur d'arbre des moteurs électriques

Annexe 3

Les niveaux d'alarme pour Le Facteur de Défaut Roulement [24]



Pour les machines de 600 à 6000 RPM les niveaux d'alarme recommandés sont :

- Alerte à 6
- Danger à 9

Ces niveaux d'alarme donnent une surveillance correcte qui peut être optimisée avec l'expérience.

En dehors des limites 600 - 6000 RPM, le FD peut aussi être utilisé. Les seuils vont alors dépendre de la configuration machine.

L'augmentation du niveau du Facteur de Défaut peut être liée à un défaut de graissage du roulement.

Aussi, en l'absence d'historique d'évolution, on procédera à un test de graissage du roulement: Le Facteur de Défaut chute généralement de manière importante de façon instantanée.

- Si le niveau du F.D reste stable à cette valeur dans les heures qui suivent l'opération, il s'agit sans doute d'un problème de graissage.
- Dans le cas contraire, il s'agit vraisemblablement d'une usure du roulement.

Annexe4

Reconnaissance des principales anomalies [19]

Type d'anomalie	Vibration		Remarques
	fréquence	Direction	
Tourbillon d'huile	De 0,42 à 0,48 x FR	radiale	Uniquement pour palier lisses Hydrodynamique, sismique à grande vitesse
Balourd	1xFR	radiale	Amplitude proportionnelle à la vitesse de rotation
Défaut de fixation	1,2,3,4 xFR	radiale	
Défaut d'alignement	2xFR	Axiale et radiale	Vibration axiale en général plus importante si le défaut d'alignement comporte un écart angulaire.
Excitation électrique	1,2,3,4 x50 Hz	Axiale et radiale	Disparaît dès coupure de l'alimentation
Vitesse critique de rotation	Fréquence critique de rotor	radiale	Apparaît en régime transitoire et s'atténue ensuite
Courroie en mauvais état	1,2,3,4 x FR	radiale	
Engrenages endommagés	Fréquence d'engrènement F : $F = N \text{ dent} \times Fr \text{ d'arbre}$	Radiale + axiale	Bande latérale autour de la fréquence d'engrènement
Faux rond pignon	$F \pm FR \text{ pignon}$	Radiale+axiale	Bandes latérale autour la fréquence d'engrènement dues aux faux rond
Excitation hydrodynamique	Fréquence de passage des aubes	Radiale et axiale	
Détérioration de roulement	Hautes fréquences	Radiale et axiale	Ondes de chocs aux caillages aide possible par «détection d'enveloppe »

Annexe5

Les valeurs des bandes latérales autour des résonances

l1 -10: 1438.3Hz, 0.0224g

-9: 1510.7Hz, *****g

-8: 1583.2Hz, *****g

-7: 1655.7Hz, *****g

-6: 1728.2Hz, 0.0219g

-5: 1800.7Hz, 0.0369g

-4: 1873.2Hz, *****g

-3: 1945.6Hz, 0.0971g

-2: 2018.1Hz, *****g

-1: 2090.6Hz, *****g

0: 2163.1Hz, 0.2368g

+1: 2235.6Hz, 0.2202g

+2: 2308.1Hz, *****g

+3: 2380.5Hz, *****g

+4: 2453Hz, 0.1894g

+5: 2525.5Hz, *****g

+6: 2598Hz, 0.11g

+7: 2670.5Hz, 0.0973g

+8: 2743Hz, *****g

+9: 2815.4Hz, 0.1018g

+10: 2887.9Hz, *****g

dX:72.5Hz

:VitRot 24.7Hz

l1 -10: 3418.6Hz, *****g

-9: 3481.3Hz, 0.1214g

-8: 3543.9Hz, *****g

-7: 3606.5Hz, *****g

-6: 3669.1Hz, *****g

-5: 3731.7Hz, *****g

-4: 3794.3Hz, 0.1465g

-3: 3856.9Hz, *****g

-2: 3919.5Hz, *****g

-1: 3982.1Hz, *****g

0: 4044.7Hz, 0.3491g

+1: 4107.3Hz, 0.3361g

+2: 4170Hz, *****g

+3: 4232.6Hz, *****g

+4: 4295.2Hz, 0.2002g

+5: 4357.8Hz, 0.2703g

+6: 4420.4Hz, *****g

+7: 4483Hz, *****g

+8: 4545.6Hz, 0.2579g

+9: 4608.2Hz, 0.1874g

+10: 4670.8Hz, *****g

dX:62.5Hz

:VitRot 24.7Hz