



**République Algérienne Démocratique et
Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique**



UNIVERSITE D'EL-OUED

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Spécialité : Génie mécanique

Option : Electromécanique industriel

Thème

**Etude de l'influence de la vibration sur la
durée de vie des roulements**

Devant le jury composé de :

CHANOUFI . H	Président
ANNANE Adel	Examineur
MENACEUR . R	Examineur
LARGOT SOULEF	Encadreur

Présenté par :

- BARIA Djihad
- NID Halima
- DIDA Ziad

2013-2014

REMERCIEMENTS

*Le travail présenté dans ce manuscrit en vue de l'obtention du
diplôme de licence sous la direction du Pr. Largot S à qui je
tiens à adresser mes plus vifs remerciements pour avoir dirigé cette
étude. Je lui exprime également ma sincère gratitude pour la
confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ce travail.*

*Je remercie les membres du jury qui me font l'honneur de juger ce
modeste travail Enfin, à tous ceux et celles qui ou de loin ont
contribué à la réalisation de ce travail.*

Je dis merci.

DEDICACE

Je voudrais dédie ce modeste travail:

*Mes très cher parents qui m'ont tant soutenu et encouragé dans
tout les domaines et surtout pour réaliser ce mémoire*

Mes frères et mes sœurs

Mes oncles et tantes

M'encadreure : soulaf largoute

Mes amis

Pour chacun d'entre nous ont aidé de prés ou de loin

RESUME

La production industrielle évolue dans un contexte de plus en plus sévère en ce qui concerne la qualité, La sécurité et les nuisances. Par conséquent, l'outil de production doit faire l'objet d'une maintenance efficace. Des pannes catastrophiques inattendues entraînent à la fois une perte de production et des factures de réparations très élevées. Sans doute, les roulements sont des éléments primordiaux sur la majorité des machines tournantes, les plus sollicitées et les plus sensibles. Suite à ces sollicitations répétées, les roulements restent l'un des points faibles de la machine.

Paliers et roulements sont des éléments de machines très sollicités. Suite à ces sollicitations répétées, leur durée de vie est limitée. La détermination de la durée de vie probable s'obtient par analyse des charges et modélisation de la cinématique. Cette estimation n'est cependant valable que sous des conditions idéales. Il n'est en aucun cas possible de tenir compte d'éléments parasites. De telles influences modifient la durée de vie du roulement et conduisent à des dégâts imprévisibles.

Lorsque le roulement se dégrade suite à l'apparition d'écaillage par exemple, ce signal se perturbe en donnant naissance à une modification de la répartition des amplitudes. Cette modification passe par la présence d'impulsions périodiques produites à chaque fois qu'un élément roulant rencontre une discontinuité sur son chemin.

Une analyse de durée de vie dans le cas de roulements en parfait état et de roulements ayant subi des éléments parasites va être également présentée ainsi que des techniques de détection des défauts et d'augmentation de la durée de vie

ABSTRACT

The industrial production evolves an increasingly severe context with regard to quality, safety and the harmful effects. Consequently, the production equipment must be the subject of an effective maintenance. Unexpected catastrophic breakdowns involve at the same time a loss of production and invoices of very high repairs. Undoubtedly, the bearings are the main elements on the majority of the machines, the most requested and most sensitive. Following these repeated requests, the bearings remain one of the weak element of the machine.

Stages and bearings are very requested elements of machines; with a limited life. The determination of the probable life is obtained by analysis of the loads and modeling of kinematics. This parameter is however valid only under ideal conditions. It is not in any case possible to take account of parasitic elements. Such influences modify the life of the bearing and lead to unforeseeable damage.

When the bearing is degraded following the appearance of chipping for example, this signal is disturbed by giving birth has a modification of the distribution of the amplitudes. This modification passes by the presence of periodic impulses produced each time that a traveling element meets a discontinuity on its way.

An analysis of life in the case of bearings in perfect state and bearings having undergone parasitic elements will be also presented as well as techniques of detection of the defects and increase in the life.

Sommaire

I/ Introduction.

II/ Construction des roulement

- 1- Conception d'un roulement
- 2- Principe de fabrication.
- 3- Acier aux roulements.
- 4- Types des roulements

III/ Etude théorique des paramètres des roulements.

- 1- La charge de base statique.
- 2- La charge de base dynamique.
- 3- La Relation entre la charge de base statique C_0 et dynamique C

IV/ Etude analytique de la durée de vie des roulements.

- 1- Modèle de Lundberg- palmgren.
- 2- Les coefficients correcteurs de durée de vie.
- 3- Lubrification des roulements.
- 4- Types des lubrifiants.
- 5- Modes de lubrification

V -Influence des conditions d'exploitation sur la périodicité de la lubrification:

- 1-Nature des détériorations des roulements.
- 2-Usure par abrasion.

VI- Surveillance et diagnostic.

- 1-Les défauts de roulements.
- 2-Niveau global de vibration.
- 3-Niveau global spécifique aux roulements
- 4-Spectre PBC (pourcentage de bande constant).
- 5- Le diagnostic.
- 6-Détermination de l'état des roulements.
- 7-Suivi de la détérioration d'un roulement par mesure vibratoire.

-conclusion

- Bibliographie.

Etat de l'art

La mécanique des milieux continus et plus particulièrement, la théorie de l'élasticité ont été mises en place entre 1920 et 1940. Les études des chercheurs de cette époque débouchèrent alors sur des systèmes d'équations qu'ils furent incapables d'exploiter numériquement du fait de l'insuffisance des moyens de calcul. C'est la raison pour laquelle, encore très récemment, les méthodes approchées, élaborées au début du siècle, étaient encore fréquemment utilisées. Si donc la théorie est restée inchangée depuis soixante ans environ, il n'en va pas de même pour les techniques de résolution numériques qui, de nos jours, sont encore en constante évolution. A titre d'exemple, on peut noter que, par suite du développement de la technologie et de la nécessité de prévoir, dès l'avant-projet, les performances des matériels, la NASA lança en 1963 un vaste programme d'études dont le but principal concernait l'élaboration de techniques nouvelles de résolution numérique. Il est à noter qu'aux mêmes dates, les mêmes études furent entreprises en France.

Toutes ces techniques de calcul sont facilement introduites dans les ordinateurs actuels qui permettent non seulement de résoudre les systèmes d'équations les plus complexes mais surtout d'obtenir les solutions exactes en limitant le nombre des hypothèses simplificatrices au minimum. Qui plus est, les informaticiens ont établi des programmes de calcul qui peuvent être mis à la disposition des utilisateurs tels les techniciens supérieurs de bureau d'études. Ceux-ci, après une courte période de formation, sont capables d'exploiter ces programmes et d'obtenir les valeurs numériques qui nécessitaient autrefois l'intervention d'ingénieurs et de mathématiciens particulièrement qualifiés.

Le problème le plus courant qui se pose à l'ingénieur d'étude concerne la détermination de la réponse $s(t)$ des systèmes mécaniques à une excitation donnée $e(t)$. Les méthodes modernes de calcul permettent d'obtenir, avec une précision et une rapidité étonnante, le rapport $s(t)/e(t)$, c'est-à-dire, la fonction de transfert du système.

Ceci étant, nous verrons dans le chapitre consacré à la maintenance, comment le suivi vibratoire et la mise en œuvre des analyseurs de spectres peuvent faciliter la tâche du personnel d'entretien et comment il est possible maintenant de passer de la maintenance préventive à la maintenance conditionnelle (ou "suivant état"), puis à la maintenance prévisionnelle. Dans la maintenance préventive, le matériel est déposé après un nombre d'heures données, lequel est déduit des statistiques d'exploitation.

II/INTRODUCTION

1-1/ Définitions:

Les roulements sont plus récents par rapport aux paliers lisses, l'apparition des roulements a été conditionnée par le remplacement du frottement de glissement par celui de roulement. Ils sont largement utilisés dans le domaine de la construction mécanique, en particulier dans le domaine des machines tournantes.

L'utilisation aussi de ce produit dans le domaine de l'automobile a donnée l'occasion de perfectionnement de la méthode de fabrication, ainsi que l'amélioration de sa qualité.

On appelle roulement, une pièce mécanique compose de plusieurs éléments entre deux organes, un mobile et l'autre immobile, le roulement est destiné à remplacer un glissement par roulement afin de réduire le frottement, il est défini par deux critères qui sont : le type et les dimensions.

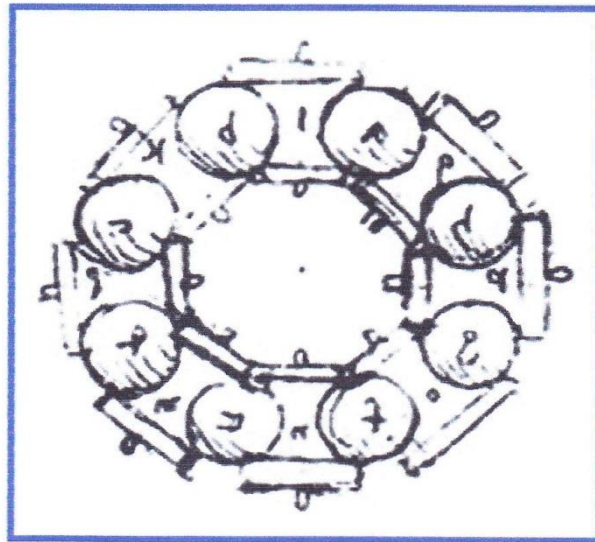
Dans le roulement est un organe mécanique, sa fonction est de permettre la transmission des charges (efforts) entre deux pièces en rotation relative l'une par rapport à l'autre avec un frottement très réduit. Il supporte et assure le guidage d'une charge tournante.

1-2/ Historique du roulement :

Dans l'antiquité et tant que l'homme ne sait pas asservir les forces de la nature, le roulement ou son principe rudimentaire fut surtout utilisé pour palier la faible puissance humaine ou celle des animaux domestiques.

Les Assyriens, de nombreux siècles, savaient substituer le frottement de roulement au frottement de glissement. Ils connaissaient déjà la roue et utilisaient couramment sous les traîneaux servant à transporter les matériaux destinés à leurs constructions, des rouleaux de bois qu'ils interposaient entre le sol et les patins de ces traîneaux pour en faciliter le mouvement.

L'étude des forces de frottement n'a été entreprise que vers 1485 par **LEONARD de VINCI**. Dans de nombreux manuscrits que nous a laissés, il établit une distinction entre le frottement des solides et celui des liquides. Il distingue encore le frottement de glissement par rapport à celui de pivotement. En outre, il a certainement confirmé l'influence de l'état des surfaces en contact, parce qu'il recommande le plus grand soin lors de leur usinage.



II/ Etude sur la construction des roulements :

II-1/ Conception d'un roulement :

La performance des roulements est directement liée à la qualité du matériau utilisé en particulier sa propreté (qualité). En effet les concentrations de contraintes liées à la géométrie du contact sont considérablement amplifiées par la présence de défauts de type inclusions non métalliques dans la zone mécaniquement sollicitée (zone de charge). On verra ainsi dans la suite que la durée de vie du roulement est totalement dépendante de la nature, la répartition et la forme de ces micro-hétérogénéités (inclusions). Il est donc absolument indispensable de sélectionner soigneusement les fournisseurs qui fabriquent des roulements de qualité.

II-2/Eléments d'un roulement :

Le roulement sans glissement des éléments roulants sur les chemins (pistes) assure la transmission de la charge (Fénergie) d'une bague à une autre. Afin d'assurer un roulement parfait, il faut que les élément roulants soient complètement séparés par un cage, (figurel)

Quelque soit le type, un roulement est constitue (composé) de quatre éléments fondamentaux, et qui sont les suivants : [1]

- La bague extérieure.
- La bague intérieure.
- Les éléments roulants.
- la cage.



(figure 1)

a/ La bague extérieure : C'est l'élément qui

limite les dimensions extérieures du roulement,

elle sera monter dans un logement fixe (bague extérieure fixe) ou dans un moyeu tournant (bague extérieure tournante).

b/ La bague intérieure : Elle est montée sur un arbre fixe ou mobile. C'est-à-dire, elle est fixe si la bague extérieure est mobile, et le contraire.

c/ Les éléments roulants : il s'agit des billes, rouleaux et des aiguilles. Ce sont les éléments des roulements qui assurent la transmission de la charge entre les deux bagues du roulement, ils sont responsables de la rotation relative d'une bague par rapport à l'autre,

d/ La cage : elle a pour rôle de maintenir le même écartement entre les éléments roulants, à fin de préserver la même zone de charge du roulement, elle ne supporte aucune charge.

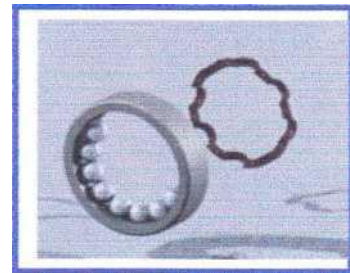
II-3/ Assemblage d'un roulement :

L'assemblage des éléments d'un roulement à billes ne semble pas évident à la vue de l'objet. C'est une opération délicate (il ne faut pas endommager les pièces) mais guère difficile.

En outre un roulement est un composant sur lequel on ne peut pas effectuer de maintenance. Les éléments sont appariés (sélectionnés pour s'assembler au mieux). La démarche suivante décrit donc l'opération de montage en fabrication d'un roulement à billes, ce qui ne correspond en aucun cas à une aide au démontage ou au remontage. [2]

1^{ère} étape:

Les billes sont disposées jointives sur le chemin de roulement de la bague extérieure. Leur espacement final sera garanti par la cage (demi -cage en arrière plan).



2^{ème} étape :

On peut alors engager la bague intérieure.

Le nombre d'éléments roulants est en partie

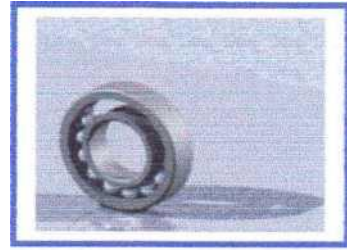
limité par cette contrainte de montage.



Trop nombreux la bague ne peut pas entrer, le montage n'est donc pas possible, même si en position théorique finale les pièces semblent avoir assez de place.

3^{ème} étape :

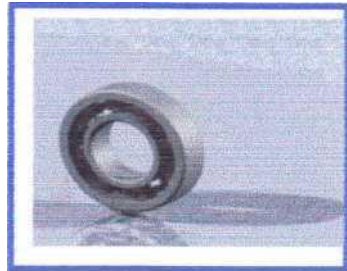
La bague intérieure se centre naturellement par appui sur les billes en s'engageant radialement dans l'arc formé par les billes. Celui ci ne doit donc pas excéder 180° (limitation encore une fois du nombre de billes).

4^{ème} étape :

Les billes sont enfin écartées pour prendre la répartition circulaire finale compatible avec la cage de roulement.

5^{ème} étape :

Les deux parties de la cage sont rapportées de part et d'autre puis assemblées par rivetage, collage, ou soudage suivant les tailles, les qualité, ou les constructeurs.



II-4/ Types de roulements :

Quelque soit la taille, la qualité et la matière utilisée pour la fabrication du roulement, les roulements sont classés de plusieurs manières.

En premier lieu, ils sont classés d'après la forme des éléments roulant utilisés (roulements à billes ou à rouleaux), et ce d'après l'importance de la charge appliquée au roulement (si la charge est importante, il faut choisir le roulement à rouleaux, ce type de roulement est très proche de celui à billes, la cage contenant des rouleaux au lieu de billes. Selon la forme des rouleaux il peut être possible de séparer les bagues. Le problème d'assemblage du roulement n'est alors plus le même. Le roulement à rouleaux supporte un effort radial supérieur par rapport au roulement à billes, car le contact des éléments roulants avec les bagues est linéaire. On utilise le roulement à rouleaux pour augmenter la surface de contact afin de minimiser les contraintes ou les pressions sur les pistes). En deuxième lieu, ils sont classés.

D'après la direction d'application de ces charges, à cet effet il existe les roulements radiaux s'il s'agit d'une charge radiale et des roulements axiaux (butées) dans le cas d'une charge axiale importante.

Le choix du type et de la taille d'un roulement est basé sur les conditions de fonctionnement et les caractéristiques de construction à fin d'assurer un bon fonctionnement à des coûts réduits.

Les facteurs qu'il faut tenir en considération pour réaliser un choix optimal de roulement sont les suivants :

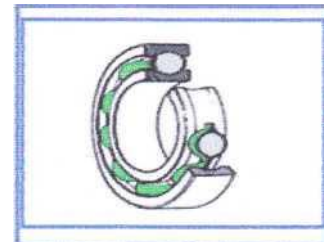
- Savoir la nature, la direction ainsi que l'intensité de la charge que doit supporter le roulement.
- La vitesse de rotation du roulement.
- La durée de vie souhaitée (demandée).
- La température à laquelle le roulement va travailler.
- La précision de fonctionnement à fin de permettre fixé le jeu interne de chaque roulement.
- Il faut tenir en compte le mode de la lubrification, ainsi que le type du lubrifiant.
- La nature de la machine pour faire le choix du type de montage du roulement.
- La matière de l'arbre et du logement qui permettent de calculer le jeu résiduel (fonctionnel) du roulement.
- L'encombrement (l'espace) réservé au roulement,

11-4-1/ Roulement rigide à une seule rangée de billes (contact radial) :

C'est un roulement symétrique, il est souvent utilisé avec gorge profonde, ce qui lui permet de supporter des charges purement radiales importantes, ou celles combinées dans les deux sens. [3]

Comme, il est adapté pour des vitesses de rotation très élevées.

Ce type de roulement se fabrique en plusieurs versions, on trouve le roulement sans protection, protégé d'un seul côté ou des deux côtés par un flasque de protection fixé sur la bague extérieure (figure2) et présente un jeu très réduit avec la bague intérieure, il permet de

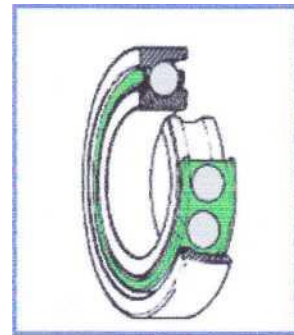


(figure2)

conserver la quantité du lubrifiant et empêcher la pénétration des corps étrangers à l'intérieur du roulement.

II-4-2/ Roulement à contact oblique à une seule rangée de billes :

Dans ce type de roulement, les pistes (chemins) sont usinées avec un épaulement haut sur la bague intérieure, et un autre bas sur la bague extérieure. Les deux épaulements sont disposés l'un en face de l'autre, à cet effet, ce type de roulement est adapté pour des charges axiales appliquées sur un seul sens. (figure3)



(figure3)

elle est réglée en fonction du jeu axial. Le jeu de fabrication est considérable de sorte que, sous charge axiale il se produit un certain angle de contact qui peut atteindre 40° .

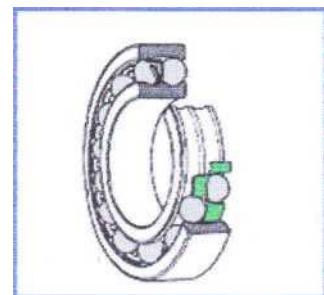
Si la charge axiale appliquée est importante, il est préférable de prendre un angle de contact important, et au contraire si la vitesse de rotation est très élevée.

II-4-3/ Roulement à contact oblique sur deux rangées de billes :

C'est le type de roulement où les bagues intérieure et extérieure possèdent deux chemins pistes chacune. Les deux rangées de billes sont disposées de façon que les angles de contact soient deux roulements à une seule rangée. Ils peuvent supporter des charges axiales importantes dans les deux sens.

II-4-4/ Roulement à rotule sur deux rangées de billes :

La bague intérieure de ce type de roulement est caractérisée par deux gorges (pistes) profondes, le moment où celle extérieure dispose d'une seule piste de forme sphérique, cette construction permet aux axes des bagues intérieure et extérieure de se basculer d'un angle assez important l'un par rapport à l'autre.



(figure4)

Ce type de roulement est adapté pour des applications où la précision d'alignement des alésages des logements n'est pas assurée. Il est caractérisé par un angle de contact réduit ce qui limite son utilisation juste pour les charges axiales réduites.

II-4-5/ Roulements montés par paire :

Dans certains cas, et dans le but d'accroître la capacité de charge des roulements, il est utile d'assurer un montage par paire des roulements à contact oblique à une seule rangée de billes, de façon que les bagues intérieures et extérieures soient disposées en opposition, c'est un montage qui permet aussi de réduire le jeu axial et radial, ou bien pour régler la zone de charge (pré charge) à fin d'augmenter la rigidité des roulements.

Les roulements qui font l'objet de ce type de montage peuvent être montés selon les trois combinaisons suivantes :

- Disposition en (X), c'est-à-dire face à face, il est désigné par le montage (DF).
- Disposition en (O), c'est-à-dire dos à dos, et qui est désigné par le montage (DB).
- Disposition en (T), c'est-à-dire face à dos, ou bien un montage (DT).

Les trois modes de montage précédent peuvent être aussi réalisé par des roulements à rouleaux coniques. [3]

II-4-6/ Roulements à une seule rangée de rouleaux cylindriques :

Pour réduire les contraintes (forces de contact) dans le cas d'une charge radiale importante, il faut que la surface de contact soit importante, dans ce cas, il est nécessaire de passer d'un contact ponctuel à un autre linéaire, c'est-à-dire il faut installer des roulements à rouleaux cylindriques au lieu des roulements à billes.

Le guidage des rouleaux dans ce type de roulements est assuré par des épaulements usinés et rectifiés sur les bagues intérieures, extérieures ou les deux bagues de roulements à la fois (selon le type de montage). Selon la forme des bagues, le roulement à rouleaux cylindrique est classé en ce qui suit :

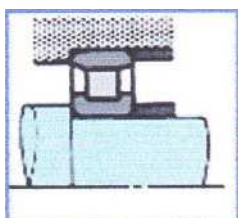
- Roulement avec bague extérieure démontable dans les deux sens.
- Roulement avec bague intérieure démontable dans les deux sens.
- Roulement avec bague intérieure démontable dans un seul sens.
- Roulement avec bague extérieure démontable dans un seul sens.

La fabrication de ces différents types donne la possibilité de les utiliser dans le cas des charges radiale importantes à des vitesses de rotation élevées, et pour des machines qui possèdent des déplacements axiaux. L'épaulement de guidage usiné sur les bagues ne permet pas l'utilisation de ce type de roulement dans le cas des charges axiales importantes.

II-4-7/ Roulements à rotule sur deux rangées de rouleaux :

Les roulements à rotules sur deux rangées de rouleaux comportent deux chemins usinés sur la bague intérieure et séparés par un épaulement à fin d'assurer un bon guidage. La bague extérieure possède un chemin de forme sphérique.

Ce type de roulement est utilisé pour compenser les défauts d'alignement, ou la flexion de l'arbre due à l'action d'une charge importante. Cette construction permet le déplacement libre de l'ensemble (bague intérieure - cage - rouleaux) à l'intérieur de la bague extérieure, à cet effet et en plus des charges radiales, le roulement peut admettre aussi des charges axiales, [3]



II-4-8/Butée à billes:

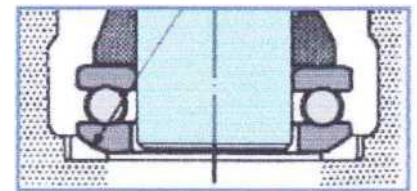
a/ Butée à billes à simple effet : Ce type de roulement est destiné pour supporter des charges purement axiales à des vitesses par fois élevées et pour maintenir le guidage de l'arbre dans un seul sens.

(figures5)

Une butée à billes comprend deux rondelles dont les surfaces intérieures sont usinées gorges profondes (chemins) dans lesquelles tournent des billes guidées par une cage. Les deux rondelles ont des alésages un peu différent, le plus petit doit être fixée sur l'arbre à cet effet, elle est appelée rondelle d'arbre, par contre la deuxième est la rondelle logement

b/ Butée à billes à double effet : Elle supporte des charges axiales, comme elle fixe l'arbre dans les deux sens. Ce type de roulement comprend une rondelle d'arbre avec une gorge profonde (chemin) sur chaque face, deux ensembles (cage - éléments roulants) et deux rondelle logements chacune possédant une gorge.

Les rondelles logements ont des surfaces d'appuis planes ou sphériques pour compenser les défauts d'alignement. Elles sont les mêmes pour les butées à simple et à double effet, ainsi que l'ensemble (cage éléments roulants). [3]



(figure5)

II-4-9/ Butée à rouleaux cylindriques:

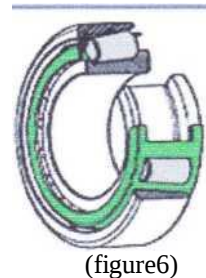
Les butées à rouleaux cylindriques sont utilisées si la capacité des butées à billes est insuffisante. Se sont de butées à simple effet qui n'admettent les charges axiales que dans un seul sens, elles peuvent supporter des très fortes charges axiales et sont très sensibles aux chocs.

On rencontre aussi les butées à rotule sur rouleaux qui sont caractérisées par un angle Formé par l'axe de la butée et la ligne d'action de la charge d'un chemin à l'autre.

Les butées à rotule sur rouleaux comprennent l'ensemble rondelle arbre et cage de rouleaux, qui sont séparables de la rondelle logement. Elles sont conçues pour des oscillations optimales grâce à la forme sphérique du chemin des rouleaux sur la rondelle logement [3]

II-4-10/ Roulements à rouleaux coniques:

Ils ont la possibilité de supporter des efforts axiaux et radiaux importants. Du fait de la disposition des contacts de roulement, les bagues peuvent se désolidariser par translation axiale. Ils ne posent donc pas les mêmes problèmes d'assemblage que les roulements à billes, (figure6)



Ils constituent une liaison rotule équivalente (unilatérale) entre les bagues. D'une grande rigidité, ce type de composant est idéal pour les guidages de grandes précisions devant subir de gros efforts (pivôt de roue de véhicules, broche de machines).

Pour le guidage d'un arbre, ils sont généralement associées par paire en opposition. Suivant la disposition des composants, on obtient un montage dit en O ou en X. Ce montage en opposition ne permettant pas la constitution d'une liaison isostatique, il y a nécessité de réglage au montage. Leur mise en œuvre est donc plus coûteuse. [3]

III/ Etude théorique des paramètres des roulements :

III- 1/ Charge de base statique C_0 :

Lorsque le roulement est immobile, effectue des mouvements alternatifs lents ou est soumis à des chocs importants en cours de rotation, sa taille doit être sélectionnée en fonction de la charge de base statique C_0 . Il s'agit de la charge correspondant à un certain niveau de contrainte au centre de l'élément roulant qui subit la charge la plus importante [4].

Choix des dimensions d'un roulement à l'aide de la charge statique de base - Charge statique de base nécessaire

Lors de la détermination des dimensions d'un roulement en fonction de la capacité de charge statique, on utilise un coefficient de sécurité donné s_0 qui représente les relations entre la charge statique de base C_0 et celle équivalente P_0 pour calculer la charge statique de base nécessaire.

La charge statique de base nécessaire C_0 est donnée par la formule

$$C_0 = s_0 P_0$$

où C_0 :charge statique de base, en N

P_0 : charge statique équivalente, N

s_0 : coefficient de sécurité statique

Les valeurs du coefficient de sécurité statique s_0 (basées sur l'expérience) sont données dans le

Mode de fonctionnement	Roulement en rotation						Roulement statique	
	Exigences de silence de fonctionnement							
	faibles		normales		supérieures			
	Roulements à billes	Roulements à rouleaux	Roulements à billes	Roulements à rouleaux	Roulements à billes	Roulements à rouleaux	Roulements à billes	Roulements à rouleaux
Régulier, sans vibrations	0,5	1	1	1,5	2	3	0,4	0,8
Normal	0,5	1	1	1,5	2	3,5	0,5	1
Chocs importants (≥)	1,5	2,5	1,5	3	2	4	1	2

tableau 1 : Valeur indicatives du coefficient de sécurité statique s_0 . [4]

Pour les butées à rotule sur rouleaux : $s_0 \geq 4$.

Pour les roulements coniques à rouleaux jointifs (roulements à vis de serrage) $s_0 \geq 2,5$.

Pour les roulements à rouleaux cylindriques et coniques avec cages en acier de type fixe $s_0 \geq 2$.

Remarques :

- Pour les températures élevées la capacité de charge statique des roulements est réduite,
- Si l'intensité de la charge n'est pas connue, utilisez des valeurs s_0 au moins aussi élevées que celles indiquées ci-dessus.
- Si l'intensité des chocs est connue avec précision, des valeurs s_0 plus faibles peuvent être appliquées.

III-2/ Charge dynamique de base C :

La charge dynamique de base C d'une série de roulements identiques est la charge radiale (ou axiale pour les butées) de direction et d'intensité constantes que peuvent supporter

90 % des roulements du groupe pendant un million de tours, dans des conditions normalisées, sans qu'apparaissent les premiers signes d'écaillage.

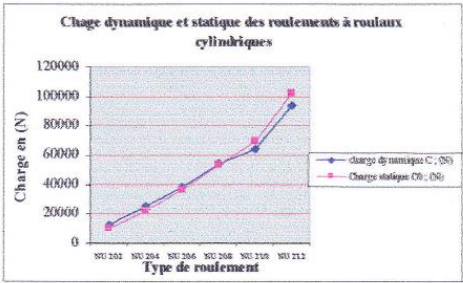
Il s'agit évidemment d'une notion statistique. En pratique cette valeur peut être calculée par une formule définie à partir du nombre et des dimensions des éléments roulants et des bagues. D'autres facteurs peuvent être pris en considération pour affiner les résultats. La charge dynamique de base n'est pas la plus forte charge qu'un roulement peut supporter. [5]

III- 3-Relation entre la charge de base statique C« et dynamique C :

1/ Roulements à billes à contact radial :

Dans le cas des roulements à billes à contact radial (contact ponctuel radial), il est claire que la charge de base statique (Co) est toujours inférieure à celle dynamique { C }, le coefficient de proportionnalité diminue avec l’augmentation de la taille du roulement. [13]

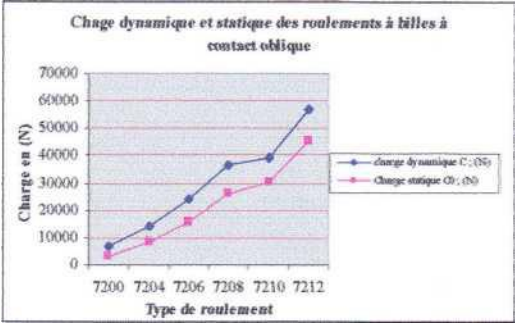
Type roui.	d (mm)	C; (N)	C0; (N)	r = C/C«
6000	10	4620	1960	2.357
6204	20	12700	6550	1.939
6206	30	19500	11200	1.741
6208	40	30700	19000	1.616
6210	50	35100	23200	1.513
6212	60	52700	36000	1.464



2/ Roulements à billes à contact oblique:

De même, les roulements à billes à contact oblique ont la même tendance (un peu faible) que ceux à contact radial en ce qui concerne le rapport entre les charges de base statique et celle dynamique.

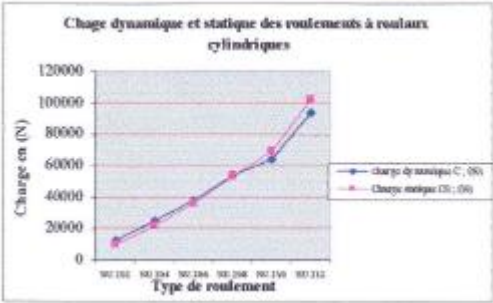
Type roui.	d (mm)	C; (N)	C0; (N)	r = C/C0
7200	10	7020	3350	2.096
7204	20	14000	8300	1.687
7206	30	23800	15600	1.526
7208	40	36400	26000	1.400
7210	50	39000	30500	1.279
7212	60	57200	45500	1.257



3/ Roulements à rouleaux cylindriques (avec déplacement sur la bague intérieure) :

Dans le cas des roulements à rouleaux le contact est linéaire, à cet effet la surface de contact est importante, le rapport entre les charges de base statique et dynamique (qui ont des valeurs très proches) diminue toujours avec l’augmentation de la taille du roulement. [13]

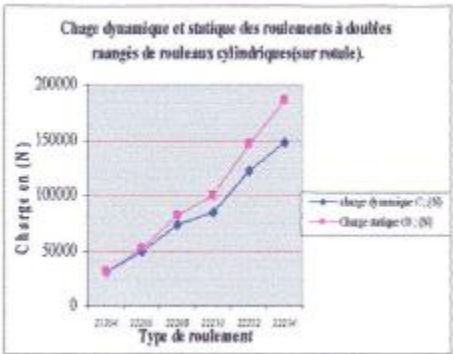
Type roul.	d (mm)	C; (N)	C ₀ ; (N)	r = C/C ₀
NU 202	15	12500	10200	1.225
NU 204	20	25100	22000	1.141
NU 206	30	38000	36500	1.041
NU 208	40	53900	53000	1.017
NU 210	50	64400	69500	0.927
NU 212	60	93500	102000	0.917



4/ Roulements sur rotule à doubles rangées rouleaux cylindriques:

Pour ce type de roulements, le contact est linéaire sur deux rangées, donc la surface de contact est très importante, c’est pour cela nous voyons que, que le rapport entre les deux charges de bases (statique et dynamique) est inférieure à l’unité ($C_0 > C$), [13]

Type roui.	d (mm)	C; (N)	C ₀ ; (N)	r = C/C ₀
21304	20	30500	30500	1.000
22206	30	48900	52000	0.940
22208	40	73600	81500	0.903
22210	50	84500	100000	0.845
22212	60	122000	146000	0.836
22214	70	148000	186000	0,796



Remarque : L’importance de la relation entre la charge de base statique et celle dynamique est liée à l’importance de la surface de contact qui a caractérise les contraintes de déformation du roulement.

Les charges effectives des roulements, qui comprennent des composants radiaux et axiaux, doivent être converties en une charge dynamique équivalente (**P**) d'intensité et direction constante, et qui agit dans le sens radial sur les roulements radiaux ou dans le sens axial sur les butées. Si cette charge était appliquée, elle aurait la même influence sur la durée de vie d'un roulement que les charges effectives auxquelles le roulement est soumis.

Pour la détermination de la charge équivalente dynamique, il faut qu'on respecte les étapes suivantes :

1. Récupérer les données X, Y, e, C, C₀ dans le catalogue constructeur pour le roulement choisi.. Il faut aussi connaître les charges axiale et radiale F_a et F_r. [7]

2. Calculer la charge dynamique équivalente P.

P est la charge appliquée au roulement correspondant à la moitié des roulements chargés.

$$P = X.F_r + Y.F_a, \text{ lorsque } (F_a / F_r) > e.$$

$$P = F_r \text{ (pour l'autre cas).}$$

P est la charge radiale pure qui induira une rupture à la fatigue au même moment que Se chargement (F_a, F_r).

On fixe parfois, très approximativement, trois domaines de charge applicables au fonctionnement des roulements ; P est ici la charge équivalente appliquée au roulement ;

- charges légères (faibles) : $P < 0,06 C$
- charges moyennes : $0,06 C < P < 0,12 C$
- charges fortes (importantes): $P > 0,12 C$

IV/ Etude analytique de la durée de vie des roulements:

Pour ne pas se tromper il est nécessaire de se baser sur des modèles de calcul validés qui prennent en compte tous les paramètres principaux du mécanisme à concevoir.

Dans le domaine étudié, dans notre cas les roulements, les modèles existent depuis plusieurs dizaines d'années et représentent le résultat d'une *somme* considérable de travaux d'adaptation et de mise en forme à la fois du développement mathématique des équations de la mécanique et du dépouillement statistique d'un certain nombre de résultats expérimentaux.

Cependant la difficulté due à la modélisation du comportement des matériaux n'a pas permis d'unifier l'ensemble des valeurs des exposants des différentes équations pour chaque type de roulements et n'a pas permis non plus d'assurer la pérennité de ce calcul dans le temps sans réajustements à l'aide de facteurs correctifs liés à l'évolution permanente des matériaux utilisés. [8]

IV -1-Modèle de Lundberg - Palmgren :

Actuellement, le calcul de la charge dynamique de base (C) et de la durée de vie des roulements (L) est basé sur les considérations de la norme ISO 281, qui pris en compte le modèle de **Lundberg - Palmgren** qui est basé de F exploitation statistique de résultats effectués sur un matériau de cette époque donnant des constantes dont l'évolution n'a pas été prise en compte dans le calcul et a du faire l'objet d'ajustement permanent par la suite.

Cette formulation a été la base du calcul pratique de la durée de vie nominale notée L1G, c'est-à-dire la durée en millions de tours atteinte par 90% d'un lot de roulements identiques (soit pour un taux cumulé de défaillances de 10%), en introduisant la notion de capacité dynamique de base C (charge pour laquelle 90% de la population atteint 1 million de révolutions), laquelle est liée à la géométrie du roulement : [3]

$$L_{10} = (C/P)^n$$

P étant la charge dynamique équivalente appliquée au roulement.

Une approche empirique avec des essais d'endurance sur roulements à billes et â rouleaux a permis de déterminer la valeur de l'exposant (n); n = 3 pour les roulements à billes, n = 10 / 3 pour les roulements à rouleaux.

- Correction de la durée de vie calculée pour d'autres cas (source SKF)

$$L=a_1. a_2. a_3.L_{10}$$

a₁: facteur de fiabilité.
Pour des probabilités de survie S, le facteur de fiabilité ai prend les valeurs suivantes :

S	0.90	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99
a ₁	1	0.62	0.53	0.44	0.33	0.21

a₂ : facteur lié à la qualité des matériaux,
a₃: facteur des conditions de fonctionnement.

IV-2- Les coefficients correcteurs de durée de vie :

La formule de base initiale du calcul de la durée de vie nominale L₁₀ a été établie pour une fiabilité de 90% (Probabilité de survie S = 0.90) pour des conditions normales de fonctionnement et pour l'acier utilisé à F époque de réalisation des essais ayant servi à déterminer les différentes constantes et exposants. [3]

Selon la norme **ISO** les conditions de fonctionnement ne doivent pas perturber la répartition normale des charges et les conditions dites normales sont les suivantes :

- Charge convenable, bonne,
- Précision d'exécution des portées et appuis (Qualité de montage).
- Défauts d'alignement minimal entre bague extérieure et intérieure.
- Jeu de fonctionnement proche du jeu nul.
- Vitesse suffisante mais inférieure à la vitesse limite.
- Température comprise entre -20 °C et +120 °C.
- Lubrification efficace (quantité et qualité du lubrifiant).
- Pas de pollution.

IV -3- Lubrification des roulements

Pour fonctionner avec fiabilité, les roulements doivent être convenablement lubrifiés, de façon à éviter un contact direct (métal/métal) entre les éléments roulants et les chemins de roulement ainsi que la cage. De plus, une lubrification correcte empêche l'usure et protège les surfaces de la corrosion. Le choix d'un lubrifiant et d'un mode de lubrification adaptés à un montage donné est donc important. [6]

Il existe une diversité de lubrifiants utilisés pour la lubrification des roulements, ainsi que des lubrifiants solides sélectionnés, (les conditions de température extrêmes). Le choix du lubrifiant dépend, en premier lieu, des conditions de fonctionnement, c'est-à-dire la **température** et de la **vitesse**, ainsi que de l'influence de l'**environnement**.

On obtient les températures de fonctionnement normales les plus favorables lorsque le roulement reçoit la **qualité** et la **quantité** de lubrifiant minimale nécessaire pour assurer une lubrification fiable

Contrairement à une idée fausse mais bien ancrée dans les esprits, le but premier de la lubrification des roulements n'est pas de réduire les frottements ; il faut avant tout que le lubrifiant crée à la surface des pièces (corps roulants, pistes et cages) des films adhérents très solides, interdisant tout contact (métal / métal), pour éviter le grippage. Un excès de lubrifiant, d'ailleurs, produit généralement une augmentation des frottements et un échauffement qui peut être très préjudiciable à la durée de vie du roulement. Il existe aussi des rôles secondaires tel que ; l'étanchéité ou la dissipation de chaleur, des quantités plus importantes sont requises, l'évacuation de la chaleur et la protection contre la corrosion.

IV-4-Types des lubrifiants :

- **La graisse** : Elle rend le roulement plus ou moins étanche (fuite et pénétration de la poussière), car en cas de contamination (condition environnementale), comme la graisse ne circule pas, les contaminants sont maintenus à l'intérieur du roulement et peuvent y exercer leurs nuisances. Dans certains cas, la graisse peut aussi attirer des produits contaminants comme la vapeur d'eau qui, en se condensant, peut avoir un effet particulièrement dangereux. [9]

La graisses au lithium est celle que l'on recommande le plus généralement pour la lubrification des roulements. Autre produits à base de lithium ont été récemment mises en circulation, et qui sont

conçues pour améliorer à la fois la **résistance aux températures élevées**, la protection des surfaces contre la **corrosion en milieu humide** et les effets des **vibrations**. Elles sont utilisées pour la lubrification des roulements fortement chargés.

Les graisses ayant des huiles de base ou des épaississants de natures ou de marques différentes ne devraient pas, en principe, être mélangées.

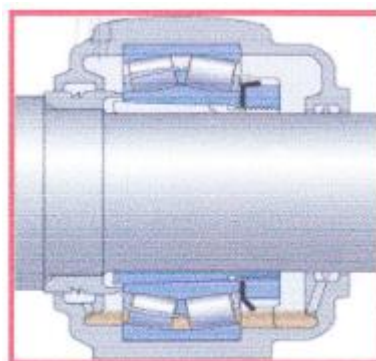
- **L'huile** : Elle a l'avantage de pouvoir circuler, ce qui favorise l'évacuation de la chaleur et surtout les débris d'usure. Il faut toutefois veiller à l'utilisation des filtres dans le système de graissage, faute de quoi elle peut introduire des polluants dans les roulements. Une **viscosité plus faible** est la qualité d'huile idéale pour les roulements exploités à des **vitesses de rotation plus élevées** et elle doit être importante pour des fortes températures. Généralement, la mise en œuvre et la maintenance d'une lubrification à l'huile sont plus coûteuses que celles d'une lubrification à la graisse (installation et analyse).

Les huiles minérales sont bien adaptées à la plupart des applications courantes, dans une gamme de températures allant de 30 à + 150°C, L'utilisation d'huiles de synthèse s'impose dans le cas d'applications sévères : fortes amplitudes thermiques, environnement chimique agressif, etc.. En outre, leur bonne résistance à l'oxydation leur confère souvent une longévité accrue par rapport aux huiles minérales.

IV-5-Modes de lubrification :

1-La lubrification à bain d'huile :

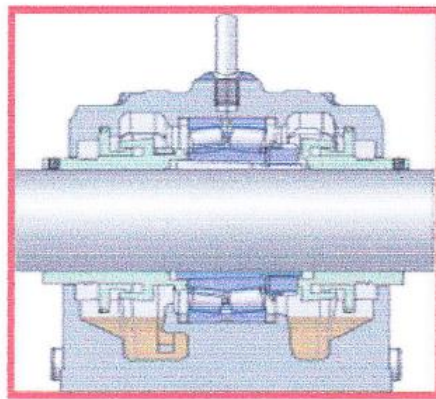
La lubrification par bain d'huile est le procédé le plus simple. L'huile est prélevée par les composants rotatifs du roulement et se répartit dans le roulement, avant de revenir au bain d'huile (réservoir). Le niveau d'huile doit presque atteindre le centre de l'élément roulant le plus bas quand le roulement est à l'arrêt, (figure7) A cet effet le respect du niveau d'huile est recommandé. Avec des vitesses de rotation élevées, le niveau d'huile peut baisser de manière significative et le palier peut être rempli de façon excessive par le niveau d'huile automatique. [6]



(figure7)

2-Bague de remontée d'huile d'huile :

Pour des roulements qui requièrent une grande fiabilité et dont les vitesses de rotation et la température de fonctionnement rendent la lubrification à l'huile nécessaire, la méthode de lubrification avec bague de remontée d'huile (cuillère) est recommandée. Cette bague entraîne la circulation d'huile. Elle est montée sans serrage à un manchon sur l'arbre, d'un côté du roulement, et plonge dans l'huile dans la moitié inférieure du palier. La rotation de l'arbre entraîne la bague, qui transporte l'huile du bas du carter. L'huile s'écoule ensuite à travers la partie arrière du roulement jusqu'à dans le réservoir situé dans le bas. Des paliers sont conçus pour être utilisés avec la méthode de lubrification à bague de remontée d'huile.
(figure8)

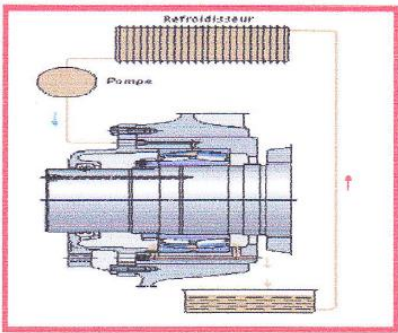


(figure8)

3-Par circulation d'huile :

Aux vitesses élevées, la température de fonctionnement augmente et l'huile vieillit plus rapidement. Pour éviter les changements d'huile fréquents et garantir un flux constant, il est recommandé d'appliquer la lubrification par circulation. La circulation est mise en œuvre habituellement à l'aide d'une pompe. L'huile est amenée d'un côté du roulement, le traverse et s'écoule du côté opposé, elle est ensuite filtrée dans un réservoir, éventuellement refroidie, puis remise dans le circuit et renvoyée au roulement. Un filtrage correct entraîne une croissance de la durée de vie du roulement. [7]

Le refroidissement de l'huile permet de maintenir à un faible niveau la température du roulement. (figure9)

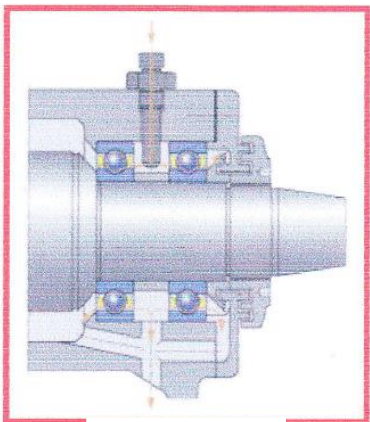


(figure9)

4 - Lubrification à jet d'huile :

Aux très grandes vitesses, il est nécessaire qu'une quantité d'huile suffisante mais non excessive pénètre dans le roulement pour assurer une lubrification adéquate sans entraîner une élévation de température injustifiée. (figure10)

Une méthode particulièrement efficace est la lubrification par jet d'huile , où un jet d'huile sous haute pression est injecté latéralement dans le roulement. La vitesse du jet doit être assez grande (au moins 15 m/s) pour traverser le tourbillon d'air provoqué par la rotation du roulement. [7]

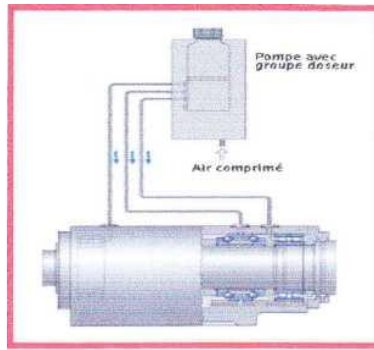


(figure10)

5-La lubrification air -huile :

Dans la lubrification dite (air/huile), de très faibles quantités d'huile précisément dosées sont acheminées vers chaque roulement par de l'air comprimé. Cette quantité minimale permet aux

roulements de fonctionner à des températures plus basses ou à des vitesses plus élevées qu'aucun autre mode de lubrification. L'huile est injectée dans les canalisations à des intervalles déterminés par un groupe doseur, (figure11) L'huile est acheminée par l'air comprimé et progresse lentement le long des parois des canalisations. Elle est projetée sur le roulement par l'intermédiaire d'un ajutage. L'air comprimé sert à refroidir le roulement et produit dans le montage une surpression qui empêche l'entrée de polluants. Pour de plus amples renseignements sur la conception des systèmes Air+Huile. [6]



6-Graissage par brouillard d'huile :

La lubrification par brouillard d'huile a longtemps été déconseillée en raison des effets néfastes qu'elle pouvait avoir sur l'environnement.

Une nouvelle génération de générateurs de brouillard d'huile permet de produire un nuage de lubrifiant avec 5 ppm d'huile. Les joints spéciaux de conception nouvelle limitent également au minimum la quantité de brouillard de dispersion. Dans le cas d'huiles synthétiques non toxiques, les effets sur l'environnement sont encore réduits. La lubrification par brouillard d'huile est aujourd'hui utilisée dans des applications très spécifiques comme l'industrie pétrolière. [7]

V-Influence des conditions d'exploitation sur la périodicité de la lubrification :

V-1-Nature des détériorations des roulements :

Lors d'emploi d'un roulement, les matériaux sont soumis à diverses sollicitations mécaniques, thermiques et chimiques qui concernent suivant les cas, soit le volume, soit la surface, soit les deux. Ces sollicitations conduisent souvent à des dégradations des matériaux.

Celles dues aux phénomènes des contacts de roulement sont fréquentes et certainement parmi les plus difficiles à étudier. On peut observer une très grande variété de défauts allant des fissures macroscopiques comme celles rencontrées sur les rails (tache ovale, écaillage...) jusqu'aux défauts microscopiques (fretting, micropiqures) qui peuvent exister sur les engrenages. Certains de ces défauts ne présentent pas de grands dangers pour la structure; d'autres au contraire peuvent entraîner des catastrophes s'ils ne sont pas détectés à temps. La détérioration est un phénomène évolutif et irréversible, c'est-à-dire la pièce détruite ne

reprendra jamais leur l'état précédent. Les nombreuses natures de détérioration des roulements sont classées en plusieurs groupes : [6]

- Abrasion.
- Déformation ou coupe par corps durs.
- Adhésion, jonctions intermétalliques.
- Micro grippages.
- Corrosion, réactivité avec l'ambiance.
- Corrosion de contact.
- Sur-contraintes provoquant des accidents brusques.
- Fluage, déformation sans perte de matière (la repousse de la matière).
- Fatigue, endommagement sous des contraintes cycliques.
- Phénomènes divers : érosion, dissolution, passage de courant électrique...

1/ L'écaillage : [13]



Ecaillage sur la bague intérieure d'un roulement à billes à gorges profondes

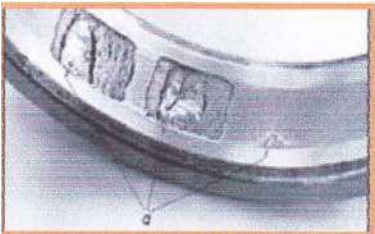


Dernière phase d'une fatigue normale : rupture brutale de la bague intérieure d'un roulement à billes à gorges profonde

Rayures sur le chemin de roulement d'une bague intérieure d'un roulement à rouleaux cylindriques

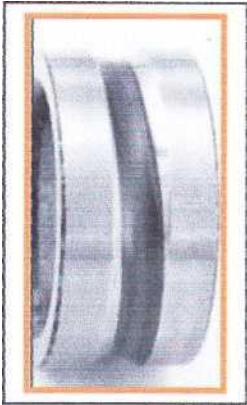


Fatigue prématurée d'une bague extérieure d'un roulement à rouleaux cylindriques précédée par des rayures qu'on peut encore



observer en «a».

Ecaillage unilatéral par suite d'un mauvais alignement de la bague intérieure fixe d'un roulement à rouleaux coniques.



Ecaillage unilatéral par suite d'un mauvais alignement de la bague intérieure fixe d'un roulement à rouleaux coniques.

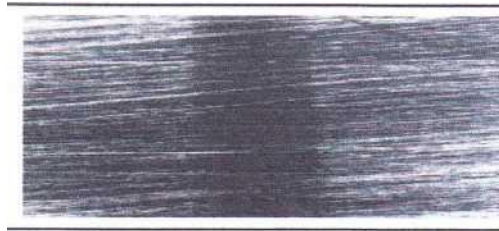


Traces d'attaque sur la piste extérieure d'un roulement à rotule sur billes.



2/ Le grippage :

C'est un effet d'adhérence (blocage) de deux mouvements relatifs. Il est caractérisé par traces brunes d'échauffement, laminage du à leurs dilatation (jeu résiduel nul) ou à un

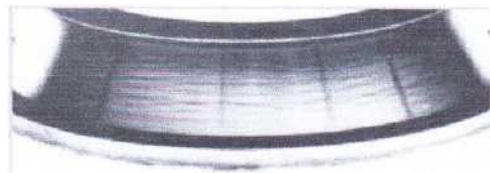


absence du lubrifiant. [13]

pièces en l'apparition des métal. Il est du

3/ Usure par déformation :

C'est une déformation plastique des chemins des roulements, causée par des chocs importants ou répétés, ou une vibration importante à haute fréquence. C'est une usure sans perte de matière (présence des empreintes). [13]



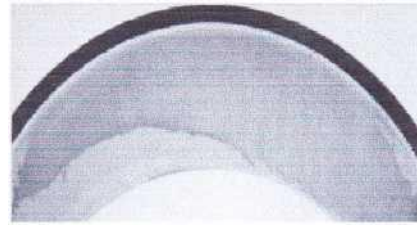
4/ Ecaillage de fatigue :

C'est un écaillage unilatéral, il est caractérisé par des petites fissures et arrachement de fragments de matière. Il se produit lors de l'application d'une surcharge , un désalignement ou lors d'un défaut sur les logements ou les portées [13]



5/ Ecaillage superficielle :

Causé par une concentration de contraintes, due à une contraintes accentuées (résultent probablement d'un défaut d'alignement). Ou bien par la modification de la zone de pré charge. Aussi par la présence des particules étrangers à l'intérieur du roulement. [13]

**6/ La corrosion :**

Causée par la présence de f humidité au points de contact des éléments roulants avec les chemins. La figure représente une corrosion sur la bague intérieure d'un roulement à rouleaux coniques [13]

**II La fissuration des bagues :**

Les coups lors du montage, le non respect des portées de roulement (ajustement trop serré). Sont responsables sur ce type de détérioration. [13]

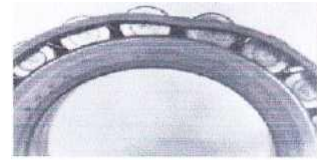
**8/ Usure par abrasion :**

Elle est caractérisée par la présence d'une couche brillante, due au glissement des éléments roulants sur les pistes, et ce par le manque du lubrifiant ou par un jeu résiduel très important. [13]



9/ La détérioration des cages :

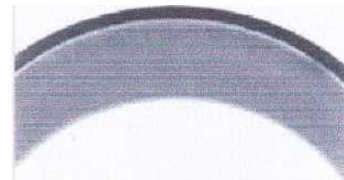
La vibration inadmissible ainsi que les coups durant



le montage sont responsable de la déformation et de la détérioration des cages. [13]

10/ La coloration :

Ce type de détérioration est dû à la réaction à haute température des éléments du roulement avec le lubrifiant. Ou bien il est causé par l'insuffisance de la quantité du lubrifiant. [13]

**IV -2-Usure par abrasion**

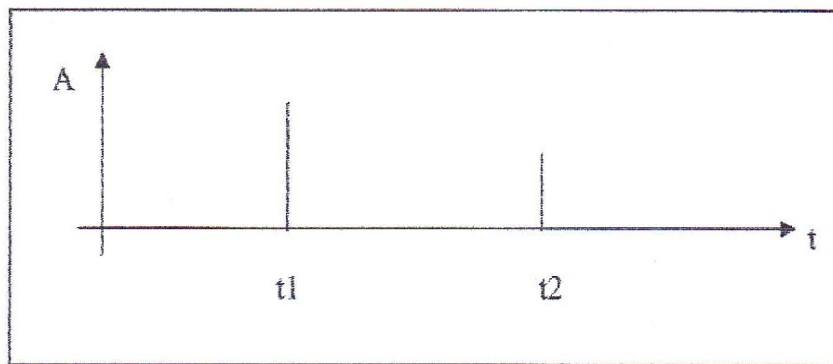
Cette forme de dégradation est généralement combattue, mais aussi utilisée pour l'usinage : des taux d'usure importants sont recherchés et obtenus avec des outils abrasifs en rectification, affûtage, etc. L'abrasion coûte très cher, on lui attribue à peu près le tiers du total des pertes économiques dues à l'usure. Elle concerne de nombreux mécanismes fonctionnant dans des conditions sévères : machines agricoles, matériels de travaux publics, matériel minier. [8]

La vibration c'est la variation d'une grandeur dans le temps, ou bien c'est un phénomène de va et vient autour d'un point de repos.

Le plus simple exemple, est de rattacher à une extrémité d'un ressort solidaire à une toiture (support) une masse, puis on tire cette dernière à une position X_{min} , après la libération de cette masse, elle fait un balancement autour de sa position de repos initiale. [9]

D'après l'évolution (ou le comportement) de la grandeur vibrante dans le temps, on distingue trois(ü3) types de vibrations :

Vibration harmonique : C'est une vibration ou la courbe (A/t) est représentée par une forme sinusoïdale.



L'équation de mouvement de ce type de vibration est donnée par la formule

$$A(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi).$$

Avec :

ω : La pulsation, $\omega = 2\pi f$, (f : la fréquence du mouvement).

φ : La phase du mouvement par rapport à un repère dans le temps.

Parmi les outils de la maintenance conditionnelle, l'analyse des vibrations est celui qui connaît aujourd'hui un des développements les plus importants du fait de l'évolution des techniques dans les domaines de l'informatique et du traitement du signal. La finalité de ce type de surveillance est destinée à assurer la sécurité de l'installation en évitant des dégradations importantes des pièces et par conséquent les arrêts imprévus, lorsque le niveau des vibrations atteint des valeurs jugées excessives (seuil d'alarme) pour le bon fonctionnement ou l'intégrité de cette dernière. Il existe différentes techniques d'investigation utilisées dans le domaine du suivi vibratoire des machines tournantes. [9]

Cependant, l'objectif du personnel de maintenance est; de **détecter** une défaillance d'une part, et **diagnostiquer** cette dernière pour connaître l'origine et Sa gravité de cette

défaillance et ce à fin de **prévoir** le temps résiduel de fonctionnement après détection d'autre part.

Le diagnostic basé sur les mesures vibratoires ne peut se faire que si les signaux vibratoires enregistrés sont riches d'informations caractéristiques de l'état réel de fonctionnement d'un roulement (machines). La qualité et la fiabilité d'une mesure vibratoire dépendent directement du matériel utilisé. L'impédance de la structure (ou la mobilité) est fonction de la situation de la source excitatrice, provoquée par un défaut, et de la position du capteur à partir duquel les signaux sont analysés.

Dans le cas d'un suivi vibratoire, la conception des bâtis peut modifier notablement le signal réel engendré par un effort dynamique (défaut), ainsi que la disparition de certaines fréquences caractéristiques de défauts et la non détection des défaillances.

VI- Surveillance et diagnostic.

La comparaison des mesures vibratoires effectuées à intervalles de temps déterminés dans des conditions si possible identiques permet de suivre l'évolution dans le temps d'un défaut en exploitant le signal vibratoire. A partir de ces mesures, il est possible d'obtenir un historique de l'évolution du défaut par rapport à un niveau de référence caractérisé par la signature vibratoire de la machine en bon état, ou proposé par le constructeur de cette machine (le niveau de vibration admissible). La norme [ME X 90-300] fixe des critères d'évaluation des niveaux vibratoires permettant d'estimer la sévérité des défauts et donc de l'état de fonctionnement de la machine. [10]

La sévérité vibratoire représente la **valeur efficace** de la vitesse de vibration mesurée dans la bande fréquentielle 10-1000 Hz sachant que les critères d'évaluation dépendent de la classe dans laquelle la machine se situe. Mais ces méthodes dites « mesures des niveaux globaux » restent imprécises et ne permettent pas la détermination de la cause de l'augmentation du niveau vibratoire dans le cas d'un roulement.

Pour établir un diagnostic vibratoire, il est souvent nécessaire de faire appel à des outils mathématiques relativement élaborés. Ces outils doivent assister l'opérateur et lui permettre de remonter aux origines des défauts. Mais dans l'absolu, les signaux vibratoires sont insuffisants pour établir un diagnostic. C'est pourquoi il est indispensable de connaître non seulement la cinématique de

la machine, mais également les caractéristiques de ses composants ainsi que leurs différents **modes de dégradation**. La connaissance de ces modes de défaillance et de leurs influences sur le niveau de vibration est à la base d'un diagnostic et d'une surveillance fiable.

VI -1-Les défauts de roulements

Le principal défaut rencontré sur le sélecteur mécanique concerne les roulements. De nombreux facteurs peuvent intervenir dans la détérioration des roulements mais c'est généralement par usure due à la fatigue de la matière.

Dans la plupart des modes d'usures, il y a augmentation des discontinuités sur les pistes ou sur un élément roulant. Les vibrations générées par un roulement neuf et en bon état sont faibles et ressemblent à un **bruit aléatoire** et lorsqu'un défaut commence à se développer, les vibrations produites par le roulement changent. Chaque fois qu'un élément roulant rencontre une discontinuité sur son chemin, une impulsion apparaît. Ces impulsions se répètent périodiquement à un rythme déterminé par l'endroit de la discontinuité, par la géométrie du roulement et par la vitesse de rotation de F arbre, Ces phénomènes répétés sont appelés fréquences caractéristiques du fonctionnement de roulement.

On constatera par exemple un défaut sur la piste extérieur du roulement grâce à la mesure de la fréquence de passage des éléments roulants sur celle-ci. Quatre fréquences caractéristiques sont à connaître :

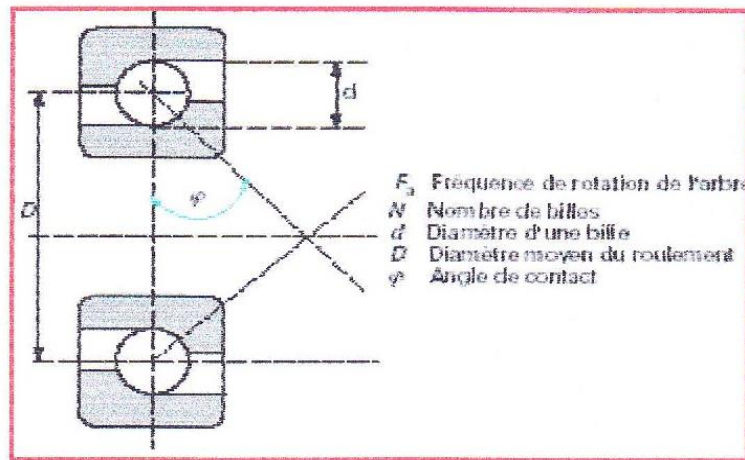
f_e pour un défaut sur la piste extérieure.

f_i pour la piste interne.

f_b , pour un défaut d'un élément roulant.

f_c pour un défaut sur la cage du roulement.

Ces fréquences peuvent être calculées à partir des formules de (WILLIS) ou peut être données par des logiciels fournis par les constructeurs de roulement. [10]



(Ecrire les formules de willis)

Toute fois il faut remarquer qu'en réalité, il y a plus ou moins de glissement entre les éléments roulants et les pistes, donc ces fréquences doivent être considérées comme approchées.

Remarques :

En réalité, dans le spectre des vibrations du mécanisme, les composantes des roulements citées précédemment sont noyées parmi d'autres de niveau plus élevé, telles que celles provenant d'un déséquilibre du rotor, d'un désalignement, d'un desserrage du support, d'une fissure de la plaque d'assise. Ceci étant commun à un nombre de machines tournantes importants (effet de masque). C'est pour cela que l'on observera les niveaux vibratoires dans une plage de hautes fréquences. Car lorsqu'un élément roulant rencontre une discontinuité, l'impact se reproduit sur la structure du roulement puis sur le bâti du mécanisme et provoque une résonance sur le châssis. Cette fréquence de résonance est une propriété de la structure et ne dépend pas du nombre d'impacts, ni de leur violence. Ces fréquences de résonances se situent généralement entre (1000 - 20000) Hz.

VI -2-Niveau global de vibration

La méthode la plus simple est la mesure de la valeur efficace globale des vibrations sur les paliers des roulements. Cette technique requiert la mesure de la valeur efficace de la vitesse de vibration sur une large bande de fréquence (typiquement 1 Hz à 1000 Hz). Ces mesures peuvent être réalisées en utilisant un accéléromètre piézoélectrique et un collecteur de données. Le fonctionnement du capteur piézoélectrique est décrit en annexe et celui du collecteur de données dans les chapitres

suivants. Ces mesures sont comparées avec les valeurs limites figurant dans les recommandations internationales comme la norme ISO 10816, utilisée d'ailleurs lors de l'équilibrage du sélecteur mécanique par la société SKF, En reportant les résultats des mesures en fonction du temps, on peut apprécier révolution des vibrations et estimer la date de remplacement du roulement. [11]

$$NG = (a^2 + b^2 + c^2 +)^{1/2}$$

Avec : a, b, c, se sont les amplitudes des composantes vibratoires constituant le signal vibration global.

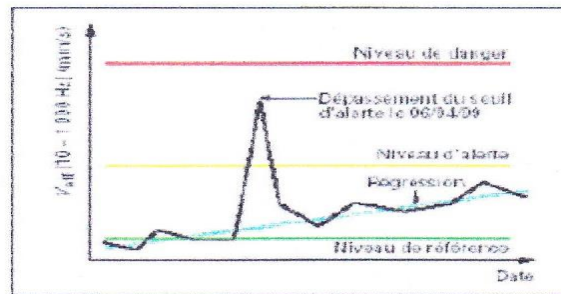


Figure12 - Exemple d'utilisation d'un niveau global

La Figure 12 illustre l'utilisation d'un niveau global avec l'indicateur vitesse efficace [10-1000 Hz], Le niveau global utilisé fait apparaître un problème. On évalue sa gravité mais on n'en connaît pas l'origine. Une telle évolution peut cependant être due à l'apparition d'un balourd ou d'un délignage. Pour trancher entre 2 causes, il est nécessaire de réaliser un diagnostic précis.

Sur une machine où le niveau vibratoire normal est relativement haut, le développement d'un défaut mécanique peut être masqué par le « bruit de fond ». Le niveau global mesuré ne réagit alors pas à ce défaut, du moins pas à un stade précoce de son développement. La surveillance par niveaux globaux ne peut donc convenir que dans le cadre d'une politique de sécurité. Elle permet de détecter un fonctionnement anormal et de déclencher *un arrêt* avant la panne des installations. En aucun cas on ne pourra identifier la cause de ce fonctionnement anormal ni optimiser la maintenance des machines avec un tel outil.

Nous verrons sur la Figure 14 la différence d'évolution entre l'accélération efficace et le facteur de crête. Elle montre bien que le niveau global de vibration (proportionnel à l'accélération efficace) augmente seulement peu de temps avant la défaillance.

VI -3-Niveau global spécifique aux roulements

a) Le Facteur de crête :

On peut être averti plus tôt du défaut du roulement en utilisant le même matériel que précédemment, mais en mesurant le facteur de crête sur la bande de fréquence [1 à 10 kHz] : [11]

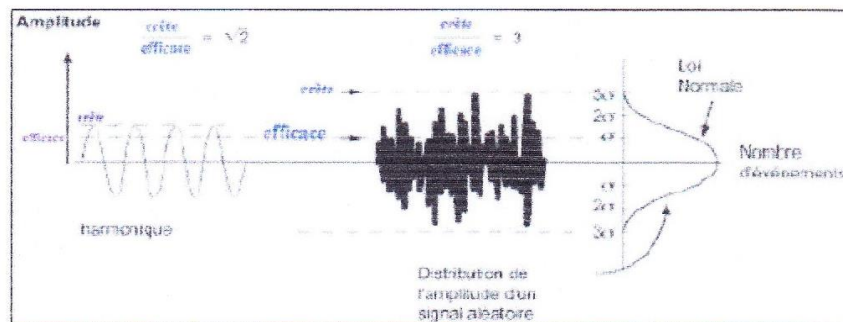


Figure13 - Evolution du facteur de crête en fonction du type de signal

La Figure 13 rappelle que le facteur de crête est égal à $\sqrt{2}$ pour un signal harmonique mais en revanche pour un signal aléatoire, la fonction de répartition des amplitudes suit une loi normale de moyenne nulle et d'écart type sigma. Le facteur de crête sera alors égal à 3. La Figure 14 montre l'évolution typique du facteur de crête quand un roulement se dégrade. Au début ce rapport est sensiblement constant. Lorsqu'un défaut localisé se développe, les petits chocs résultants accroissent notablement le niveau de crête, mais ont une influence faible sur la valeur efficace. Le niveau de crête augmente ensuite jusqu'à un maximum. Au fur et à mesure que le roulement se détériore, il y a davantage d'impacts générés à chaque passage de bille. Le niveau efficace augmente donc, tandis que le niveau de crête reste inchangé. Vers la fin de vie du roulement, le facteur de crête peut retomber à sa valeur initiale car la valeur efficace a augmenté à son tour.

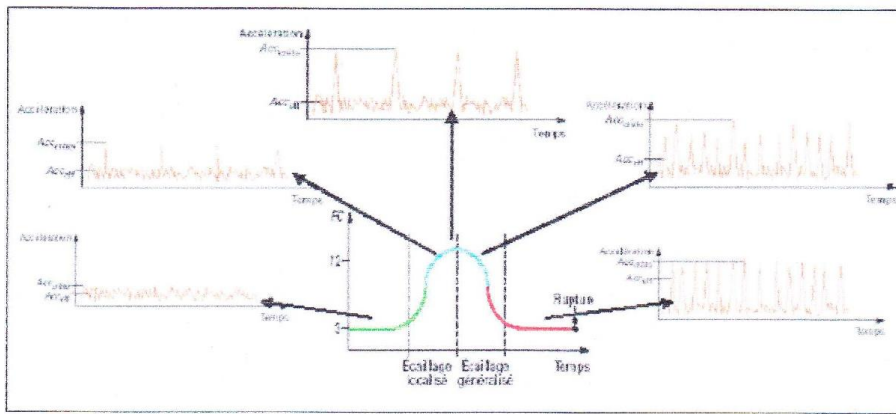


Figure14 - Evolution du facteur de crête en fonction de l'évolution d'un défaut de roulement

Le défaut majeur de cet indicateur est de présenter environ les mêmes valeurs dans les deux cas extrêmes (état neuf et fin de vie du roulement). Seule son évolution est donc significative.

b) Le Kurtosis :

Les vibrations de types sinusoïdal ou impulsionnel génèrent des allures de courbes de densité différentes. Le kurtosis, qui quantifie cette différence, est donné par : [11]

$$K = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{(x - \bar{x})^4}{\sigma^4} P(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} P(x) dx}$$

Avec ; x : amplitude instantanée du signal

$\bar{x}$: valeur moyenne de x

P(x) : probabilité d'apparition de x

s : P écart-type

Concrètement, le kurtosis quantifie l'aplatissement de la courbe de densité de probabilité du signal enregistré. Il donne une grande importance aux amplitudes élevées tout en pondérant les événements isolés, contrairement au facteur de crête. La valeur du kurtosis est de 1,5 pour un signal harmonique et de 3 pour un signal aléatoire. Pour un roulement en bon état la valeur du kurtosis est de l'ordre de 3 alors qu'elle s'approche de 4 lorsque le roulement se détériore.

VI -4-Spectre PBC (pourcentage de bande constant) :

La technique de surveillance des installations à chaîne cinématique simple (une seule ligne d'arbre) par comparaison de spectres PBC est une technique fiable et rapide. Le spectre PBC se présente sous forme de « bandes » juxtaposées selon une échelle logarithmique de la fréquence. Le rapport « largeur de bande /valeur de fréquence centrale » reste constant Il est généralement égal à 6%, 23% ou 70 %. Ces valeurs sont couramment utilisées dans F industrie et proviennent de l'analyse sonore (voir en annexe 1 le détail concernant les filtres).

On représente le spectre PBC sur des échelles logarithmiques en abscisses et ordonnées (Figure 15). Le résultat est une image haute résolution aux basses fréquences (BF) afin de bien distinguer les composantes caractéristiques des défauts tels que le balourd, le désalignement, les instabilités des rotors. Dans les hautes fréquences (HF), la résolution est faible mais suffisante pour détecter les défauts de roulements. [11]

a) largeur de bande

Une largeur de bande relative de 6 % de la fréquence centrale apporte une solution optimale. Avec une telle largeur de bande relative on aura une haute résolution en basse fréquence pour détecter un défaut de balourd et une résolution suffisante en haute fréquence pour observer une augmentation d'une ou plusieurs bandes de fréquences lors d'un défaut de roulement. Sur la Figure 15, par exemple on voit que:

- ❖ la bande centrée sur 25,90 Hz a une largeur de : $(6/100) \times 25,90 = 1,55$ Hz
- ❖ la bande centrée sur 2 740 Hz a une largeur de : $(6/100) \times 2\,740 = 164,40$ Hz

b) Niveaux de référence, alerte et danger

Le niveau de référence, en vert sur la courbe, représente la signature de la machine.

Cette signature est établie lors des premières campagnes de mesures. Le niveau d'alerte est déduit du niveau de référence de la façon suivante : Alerte = Référence + 6 dB et le niveau de danger est déduit du niveau de référence par : Danger = Référence + 20 dB.

Etant donné la grande largeur de bande fréquentielle d'un spectre PBC, il est impératif de travailler en accélération et non en vitesse avec ce type d'outil comme nous Pavions précisé dans les généralités.

VI -5- Le diagnostic

Toutes Ses méthodes précédentes permettent d'estimer à peu près la date à laquelle il faudra réviser la machine, mais mieux on connaît la nature du défaut, plus sûre est la prévision.

Les paragraphes suivants décrivent les techniques de « zoom » ou « analyse d'enveloppe » qui permettent d'en savoir davantage sur les défauts. [11]

I- Introduction

a)Principes

La surveillance a pour finalité, tout au moins sous sa forme primaire, de détecter à un stade le plus précoce possible, l'existence d'une anomalie et d'en suivre l'évolution à partir d'indicateurs préalablement définis. Comme nous Pavons précisé précédemment, un indicateur de surveillance ne peut être sensible à l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter une machine. Le diagnostic, au contraire, doit permettre de statuer sur l'existence d'anomalies, d'en identifier la nature et d'en préciser la gravité. Le diagnostic par analyse de vibration est non seulement l'outil de base de la maintenance prévisionnelle, mais aussi du contrôle qualité dans le cas d'un relevé vibratoire d'une installation neuve ou après remise en état.

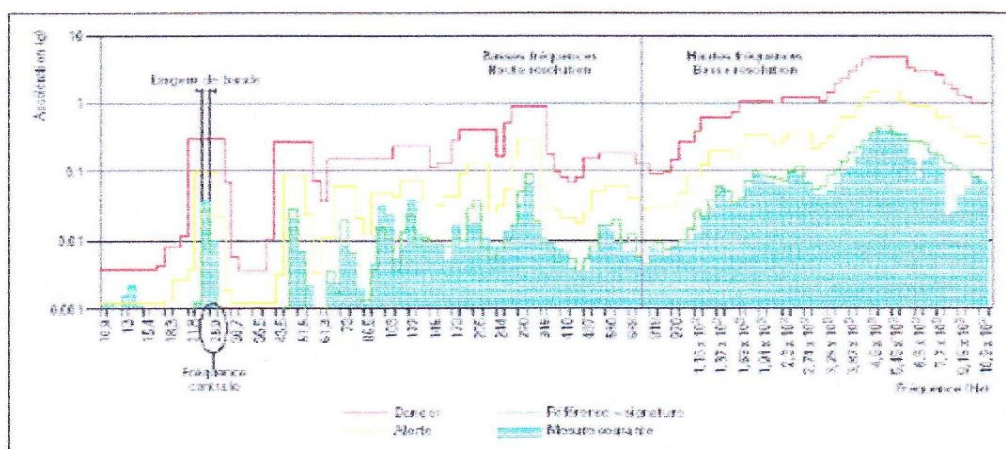


Figure15 - Exemple de spectre PBC

b) Définition

Pour mieux cerner le concept de diagnostic, il est important de se reporter au sens premier de ce mot couramment utilisé dans le monde médical :

Diagnostic (du grec diagnosis : connaissance) : action d'identifier une maladie (un défaut, une anomalie) à partir d'une analyse méthodique des symptômes présentés par le malade (la machine).

Formuler un diagnostic, c'est identifier des symptômes caractérisés par des indicateurs qualitatifs ou quantitatifs et les relier à des causes. Un diagnostic est en général engagé lorsque des signes jugés anormaux se manifestent. La finalité première de la surveillance est la détection la plus précoce possible de ces signes anormaux. Mais un diagnostic peut aussi être demandé :

- pour confirmer un comportement normal et justifier, par exemple, le report d'une révision systématique ou d'un échange standard d'un organe, ou pour s'assurer du bon état vibratoire d'un équipement neuf ou révisé.
- pour connaître le comportement vibratoire d'une machine pour des conditions d'exploitations nouvelles (augmentation des vitesses de rotation).

c) Fiabilité du diagnostic [12]

Le diagnostic sera souvent grandement facilité si l'on dispose :

- de la fiche cinématique de la machine, d'un historique des pannes et des modifications apportées à la machine depuis sa mise en service,
- de l'ensemble des valeurs des indicateurs et spectres de base constituant la signature vibratoire initiale de l'installation considérée en bon état.

Ces éléments apportent une aide appréciable dans la formulation d'un diagnostic. Comme la fiabilité du diagnostic repose avant tout sur l'identification de toutes les images vibratoires contenues dans les signaux délivrés par les capteurs, le traitement du signal joue un rôle essentiel. La fiabilisation de la phase d'identification systématique de toutes les images vibratoires nécessite de suivre une démarche rigoureuse en méthodologie. [12]

2-Spectre RC (résolution constante) et le zoom

C'est une représentation de l'amplitude de l'accélération reportée sur un axe linéaire en fréquence. Notre appareil possède une résolution de 400 lignes, mais pourrait être de 800 ou 1200 lignes sur d'autres appareils. Le spectre obtenu sera donc une courbe passant par 400 points régulièrement espacés en fréquence.

La bande de fréquences Δf se définit avant de procéder aux mesures sur site. On distingue :

- les spectres BF (basses fréquences [0-50 Hz]) ;
- les spectres MF (moyennes fréquences [0-500 Hz]) ;
- les spectres HF (hautes fréquences [0-10 000 Hz]) ;

— les zooms haute résolution

➤ **Définition de l'image, résolution**

Comme nous Pavions indiqué dans les généralités, la résolution est définie par le pas dont F expression est : $\text{Pas} = \Delta f / 400$

Où Δf est la bande de fréquences analysée.

La définition de Limage sera d'autant meilleure que la bande de fréquences analysée sera étroite.

On aura par exemple :

— un spectre HF [0-10 000 Hz] aura un pas de $10\,000 / 400 = 25$ Hz.

— un spectre BF [0-50 Hz] aura un pas de $50 / 400 = 0,125$ Hz ;

— un zoom [152-158 Hz] aura un pas de $6 / 400 = 0,015$ Hz ;

On utilisera un spectre HF (haute fréquence) pour suivre révolution du niveau vibratoire de la machine. Si un phénomène anormal apparaît, on peut distinguer s'il s'agit d'un problème de roulement (hautes fréquences), d'engrènement (fréquences caractéristiques prédéfinies)... Son utilisation est comparable à celle d'un spectre PBC. Il reste plus précis que celui-ci pour certains phénomènes mais nécessite plus d'espace mémoire. [12]

Le diagnostic de précision nécessite le recours au spectre BF (basse fréquence) ou au *zoom* centré sur une fréquence particulière. En effet, certains défauts tels que des défauts de denture ou de « faux rond » sur les engrenages ne s'identifient avec précision que sur des images dont le pas est souvent inférieur à 0,5Hz.

Le Tableau 8 donne quelques exemples de défauts courants visibles sur un spectre RC. Les fréquences surveillées étant élevées, on utilisera systématiquement les représentations en accélération avec de tels outils.

$Fr = N/60$: fréquence de rotation en hertz, avec N = vitesse de rotation en tr/min

Défauts	Fréquences caractéristiques
Balourd mécanique	Fr
Désalignement	$2Fr, 3Fr, \text{ et/ou } 4Fr$
Frottement	jeux Peignes de raies d'un pas de $(1/2)Fr$ et Fr
Engrènement	$(z \text{ dents}) z.fr$ modulé par Fr
Passages d'aubes	$(n \text{ aubes}) n.Fr$

Tableau2 - Défauts et fréquences caractéristique [12]

INTRODUCTION :

Quelque soit l'origine des défauts, ceux-ci se repercutent au niveau de l'analyse spectrale. Ces deux aspects sont examinés dans ce paragraphe.

Les incidents de roulements se classent en trois catégories principales suivant qu'ils sont dus à des défauts de fabrication, des erreurs de montage ou une lubrification insuffisante. La surveillance des machines tournantes consiste à suivre l'état de marche de machine et son évolution en fonctionnement en vue de relever la mesure au niveau des paliers (fixe et libre) permettant de qualifier un état général, par comparaison à des normes ou à des mesures antérieures et donne l'analyse spectrale permettant de diagnostiquer l'origine d'un problème et de suivre leur évolution en fonction du temps.

Application de l'analyse vibratoire aux machines tournantes

La surveillance des machines tournantes consiste à suivre l'état de marche de la machine et son évolution en fonctionnement, de manière à diagnostiquer et programmer à l'avance les interventions de maintenance.

Au niveau de l'unité MRE, il y a un système expert (vibroexpert) utilisé dans ce but, autrement dit :

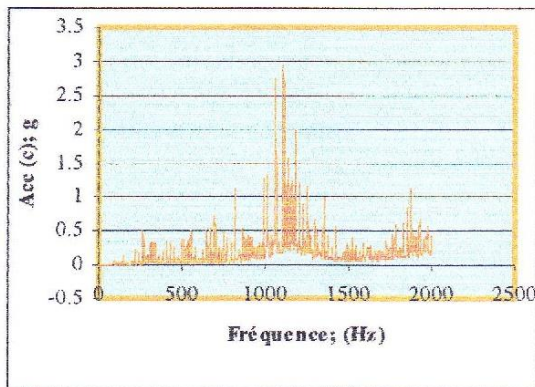
- la mesure de niveau global permettant de qualifier un état général, par comparaison à des normes ou à des mesures antérieures.
- l'analyse spectrale permettant de diagnostiquer l'origine d'un problème et de suivre leur évolution en fonction du temps.

Durant cette période notre tâche est l'utilisation de cet outil et éventuellement d'apporter s'il est possible notre contribution dans son développement.

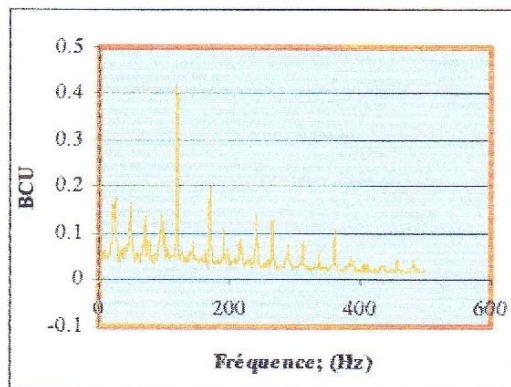
Exemples de surveillance et de diagnostic

Le présent paragraphe illustre la détection des deux principaux défauts que l'on peut rencontrer sur les sélecteurs mécaniques ainsi que leur manifestation vibratoire.

Machine : Pompe centrifuge (PMA), Vitesse de rotation : 1500; tr/min, Roulement : 6318,
P : 500 Kw, Palier : 4,



Spectre de vibration



Spectre d'enveloppe de vibration (BCU)

Le pic 1 (spectre normale) : (1108 ; 2,909).
Le pic 2 (spectre normale) : (1060 ; 2,730).

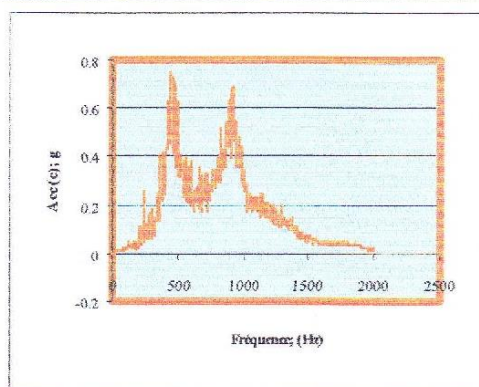
Le pic 1 (BCU) : (120 ; 0,415).
Le pic 2 (BCU) : (170 ; 0,198)

Les fréquences caractéristiques des défauts des éléments du roulement en (Hz) sont :

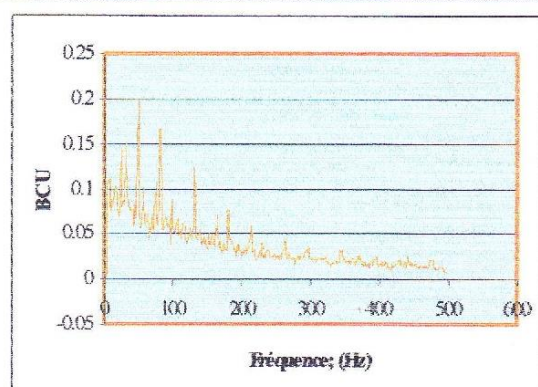
$$f_i = 122,68 \quad f_e = 77,32 \quad f_b = 104,57 \quad f_c = 9,67$$

Donc, d'après le spectre en (BCU), on peut conclure que le défaut affectant ce roulement est un défaut sur la bague intérieure.

Machine : Pompe centrifuge (PMA), Vitesse de rotation : 1500 ; tr/min, Roulement : 6318, P :
500 Kw, Palier : 4(H),



Spectre de vibration



Spectre d'enveloppe de vibration (BCU)

Le pic 1 (spectre normale) : (472,5 ; 0,732)
Le pic 2 (spectre normale) : (917,5 ; 0,692)

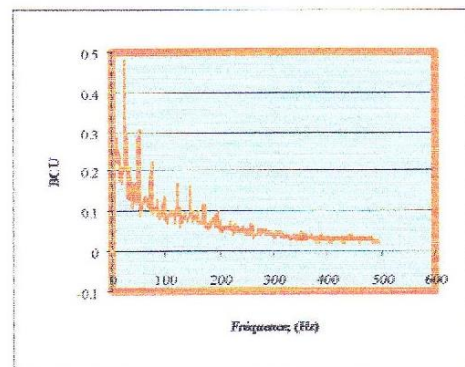
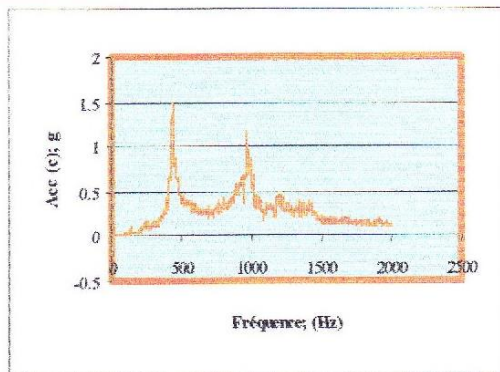
Le pic 1 (BCU) : (50 ; 0,196)
Le pic (BCU) : (82,5 ; 0,166)

Les fréquences caractéristiques des défauts des éléments du roulement en (Hz) sont :

$$f_i = 122,68 \quad f_e = 77,32 \quad f_b = 104,57 \quad f_c = 9,67$$

Donc, d'après le spectre en (BCU), on peut conclure que le défaut affectant ce roulement est un défaut sur la bague extérieure.

Machine : Pompe centrifuge (PMA). Vitesse de rotation : 1500 tr/min. Roulement : 6318
P : 500 Kw, Palier : 4(H).



Le pic 1 (spectre normale) : (440 ; 1,449)
Le pic 2 (spectre normale) : (972,5 ; 1,071)
Le pic 3 (BCU) : (75 ; 0,217)

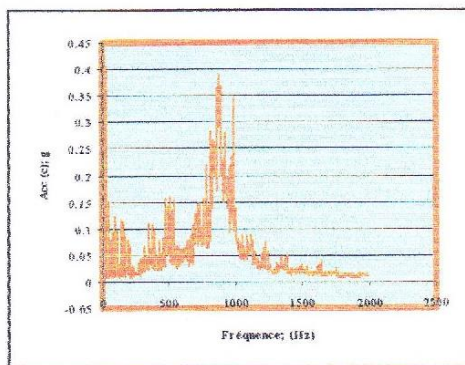
Le pic 1 (BCU) : (25 ; 0,472)
Le pic 2 (BCU) : (50 ; 0,300)
Le pic 4 (BCU) : (98,75 ; 0,117)

Les fréquences caractéristiques des défauts des éléments du roulement en (Hz) sont :

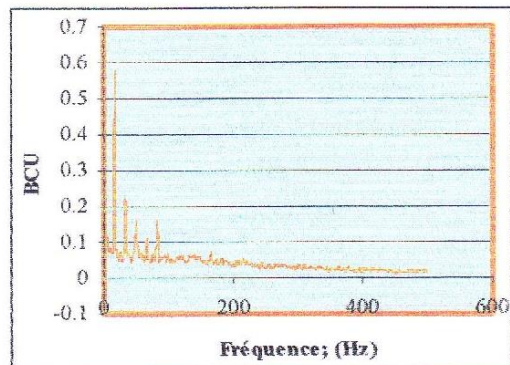
$$f_i = 122,68 \quad f_e = 77,32 \quad f_b = 104,57 \quad f_c = 9,67$$

Donc, d'après le spectre en (BCU), on peut conclure que le défaut affectant ce roulement est un défaut sur la bague extérieure.

Machine : Vent -1 (PMA) ; Vitesse de rotation : 992 tr/mn ; Roulement :
NU248 P= 3600 Kw ; Palier 2(H) .



Spectre de vibration



Spectre d'enveloppe de vibration (BCU)

Le pic 1 (spectre normale) : (877,5 ; 0,391)
Le pic 2 (spectre normale) : (985 ; 0,344)
Le pic 3 (BCU) : (50 ; 0,164)

Le pic 1 (BCU) : (16,25 ; 0,575)
Le pic 2 (BCU) : (33,75 ; 0,211)
Le pic 4 (BCU) : (66,25 ; 0,111)

Les fréquences caractéristiques des défauts des éléments du roulement en (Hz) sont :

$$f_i = 177,85 \quad f_e = 136,28 \quad f_b = 122,73 \quad f_c = 7,17$$

Donc, d'après le spectre en (BCU), on peut conclure que le défaut affectant ce roulement

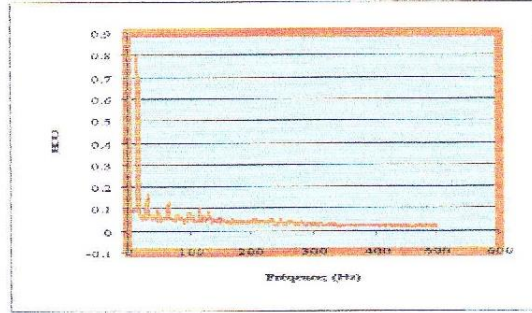
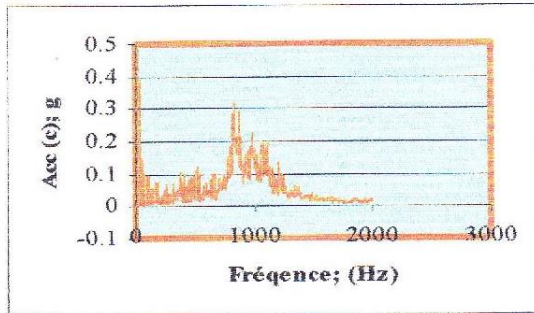
Machine : Vent N°1 (PMA) ; Vitesse de rotation : 992 tr/mn ; Roulement : NU248
P= 3600 Kw ; Palier 2(H)

$F_i = 177,85 \text{ Hz}$;

$F_e = 136,28 \text{ Hz}$;

$F_b = 122,73 \text{ Hz}$;

$F_c = 7,17 \text{ Hz}$.



Le pic 1 (spectre normale) : (845 ; 0,3210)

Le pic 1 (BCU) : (16,25 ; 0,7856)

Le pic 2 (spectre normale) : (875 ; 0,2989)

Le pic 2 (BCU) : (33,75 ; 0,1479)

Donc, d'après le spectre en (BCU), on peut conclure que le défaut affectant ce roulement est un défaut sur la bague extérieure.

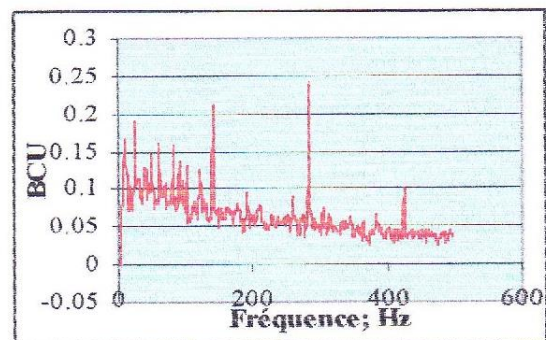
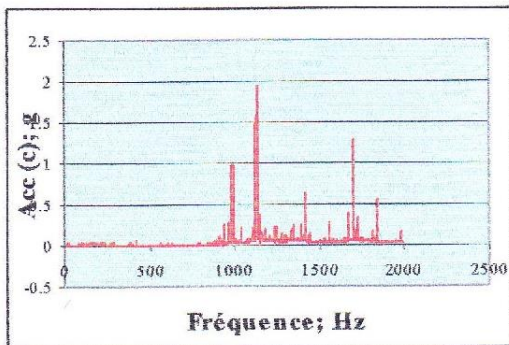
Machine : Pom 04/507 (HF2) ; Vitesse de rotation : 1500 tr/mn ; Roulement : 6318
P= 500 Kw ; Palier 2(H)

$F_i = 122,68 \text{ Hz}$;

$F_e = 77,32 \text{ Hz}$;

$F_b = 104,57 \text{ Hz}$;

$F_c = 9,67 \text{ Hz}$.



Le pic 1 (spectre normale) : (1132,50 ; 1,9517)

Le pic 1 (BCU) : (283,75 ; 0,2411)

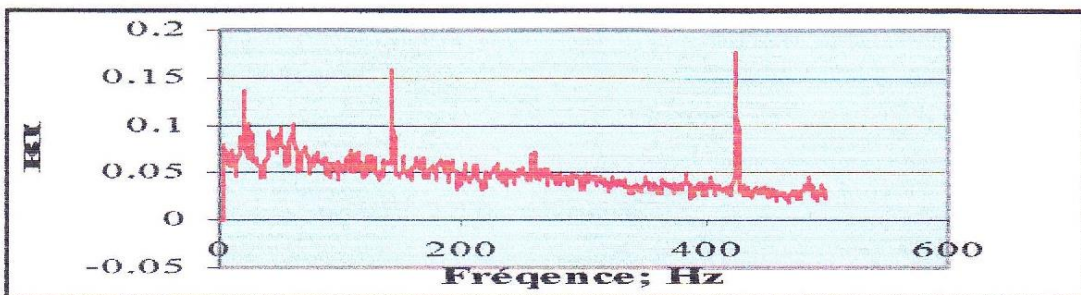
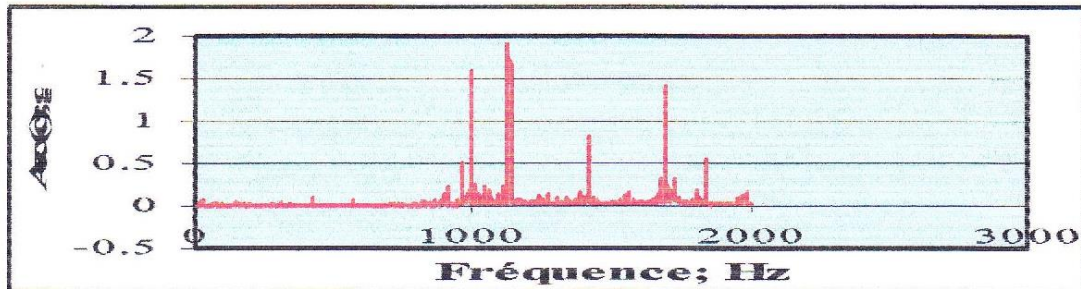
Le pic 2 (spectre normale) : (1700 ; 1,2508)

Le pic 2 (BCU) : (142,50 ; 0,2121)

Donc, d'après le spectre en (BCU), on peut conclure que le défaut affectant ce roulement est un défaut sur la bague extérieure.

Machine : Pom 04/507 (HF2) ; Vitesse de rotation : 1500 tr/mn ; Roulement : 6318
P= 500 Kw ; Palier 2(H)

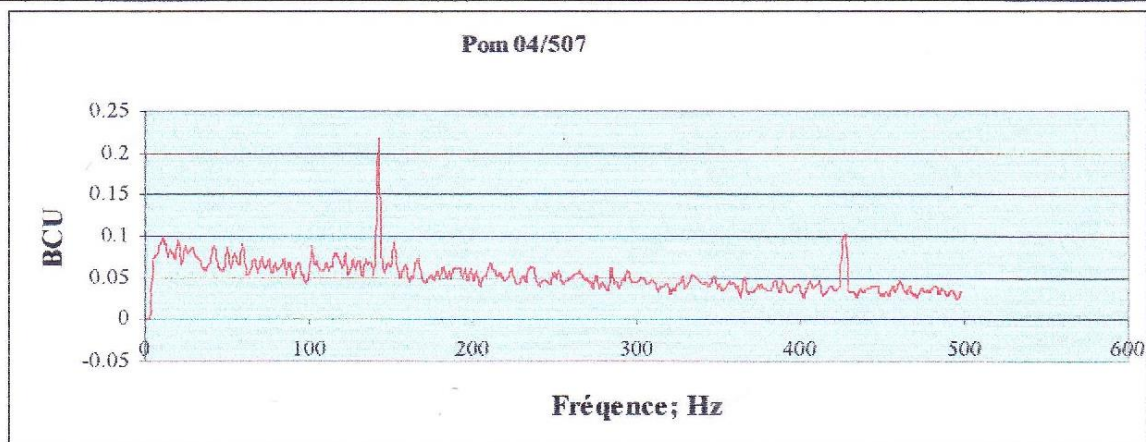
$F_i = 122,68 \text{ Hz}$; $F_e = 77,32 \text{ Hz}$; $F_b = 104,57 \text{ Hz}$; $F_c = 9,67 \text{ Hz}$.



Le pic 1 (spectre normale) : (1132,50 ; 1,8858) Le pic 1 (BCU) : (426,25 ; 0,1727)
Le pic 2 (spectre normale) : (992,50 ; 1,5676) Le pic 2 (BCU) : (141,25 ; 0,1547)
Donc, d'après le spectre en (BCU), on peut conclure que le défaut affectant ce roulement est un défaut sur la bague extérieure.

Machine : Pom 04/507 (HF2) ; Vitesse de rotation : 1500 tr/mn ; Roulement : 6318
P= 500 Kw ; Palier 2(H) ;

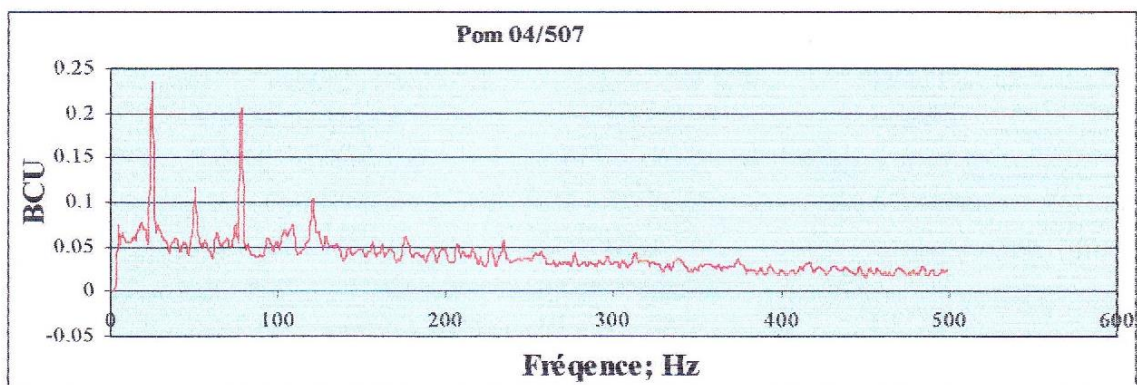
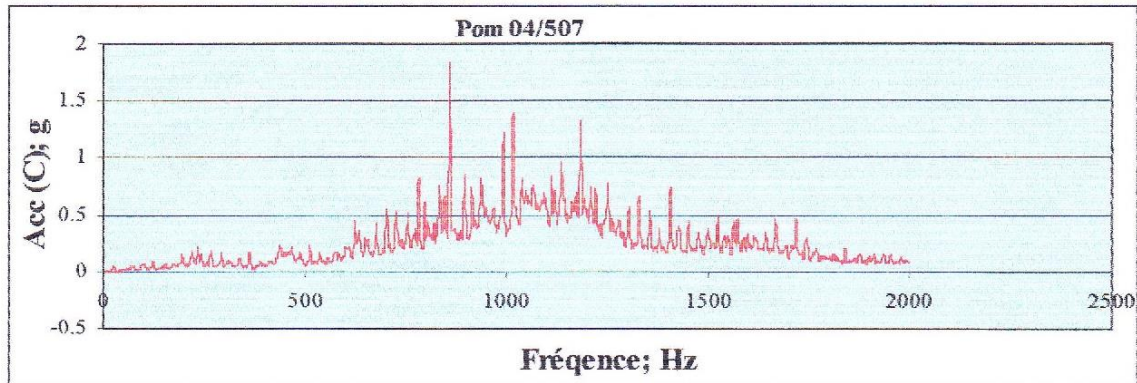
$F_i = 122,68 \text{ Hz}$; $F_e = 77,32 \text{ Hz}$; $F_b = 104,57 \text{ Hz}$; $F_c = 9,67 \text{ Hz}$.



Le pic 1 (spectre normale) : (1705,50 ; 1,4381) Le pic 1 (BCU) : (142,50 ; 0,2171)
Le pic 2 (spectre normale) : (1137,50 ; 1,2350) Le pic 2 (BCU) : (427,50 ; 0,1014)
Donc, d'après le spectre en (BCU), on peut conclure que le défaut affectant ce roulement est un défaut sur la bague interne.

Machine : Pom 04/507 (HF2) ; Vitesse de rotation : 1500 tr/mn ; Roulement : 6318
 P= 500 Kw ; Palier 4 (H) .

$F_i = 122,68 \text{ Hz}$; $F_e = 77,32 \text{ Hz}$; $F_b = 104,57 \text{ Hz}$; $F_c = 9,67 \text{ Hz}$.



Le pic 1 (spectre normale) : (860 ; 1,8426)

Le pic 1 (BCU) : (25 ; 0,2355)

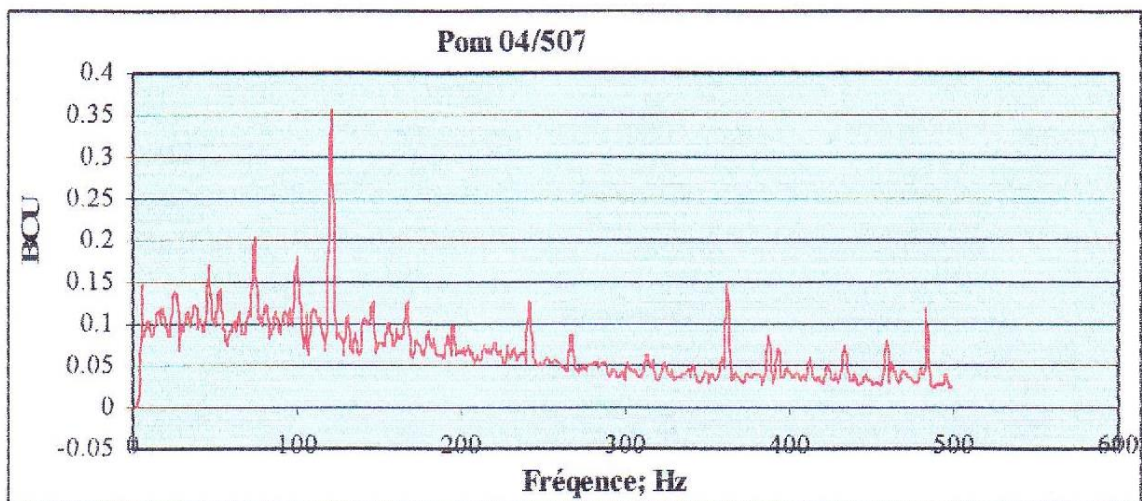
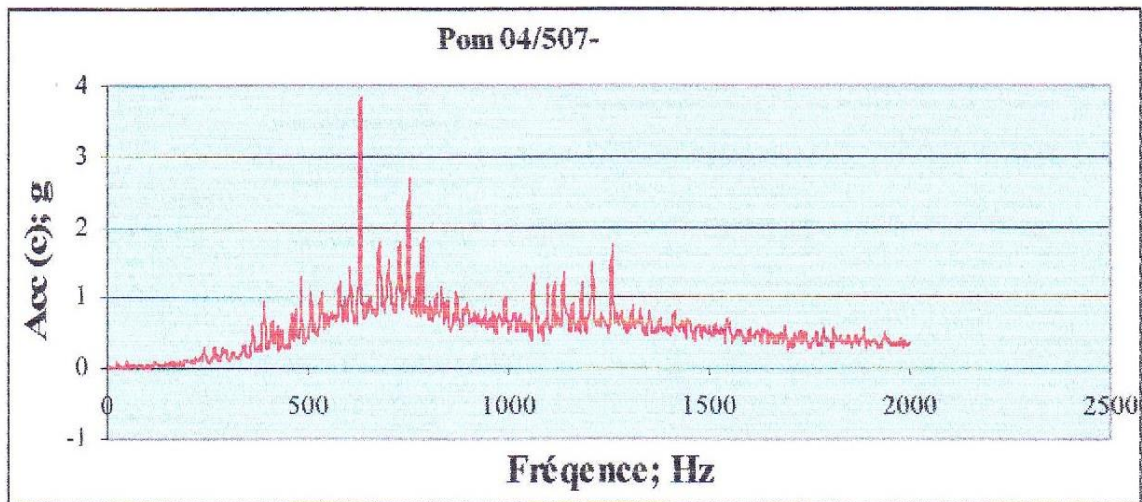
Le pic 2 (spectre normale) : (1017,50; 1,3728)

Le pic 2 (BCU) : (78,75 ; 0,2045)

Donc, d'après le spectre en (BCU), on peut conclure que le défaut affectant ce roulement est un défaut sur la bague externe.

Machine : Pom 04/507 (HF2) ; Vitesse de rotation : 1500 tr/mn ; Roulement : 6318
 P= 500 Kw ; Palier 4 (H)

$F_i = 122,68 \text{ Hz}$; $F_e = 77,32 \text{ Hz}$; $F_b = 104,57 \text{ Hz}$; $F_c = 9,67 \text{ Hz}$.



Le pic 1 (spectre normale) : (630 ; 3,7746)

Le pic 1 (BCU) : (121,25 ; 0,3519)

Le pic 2 (spectre normale) : (750 ; 2,6795)

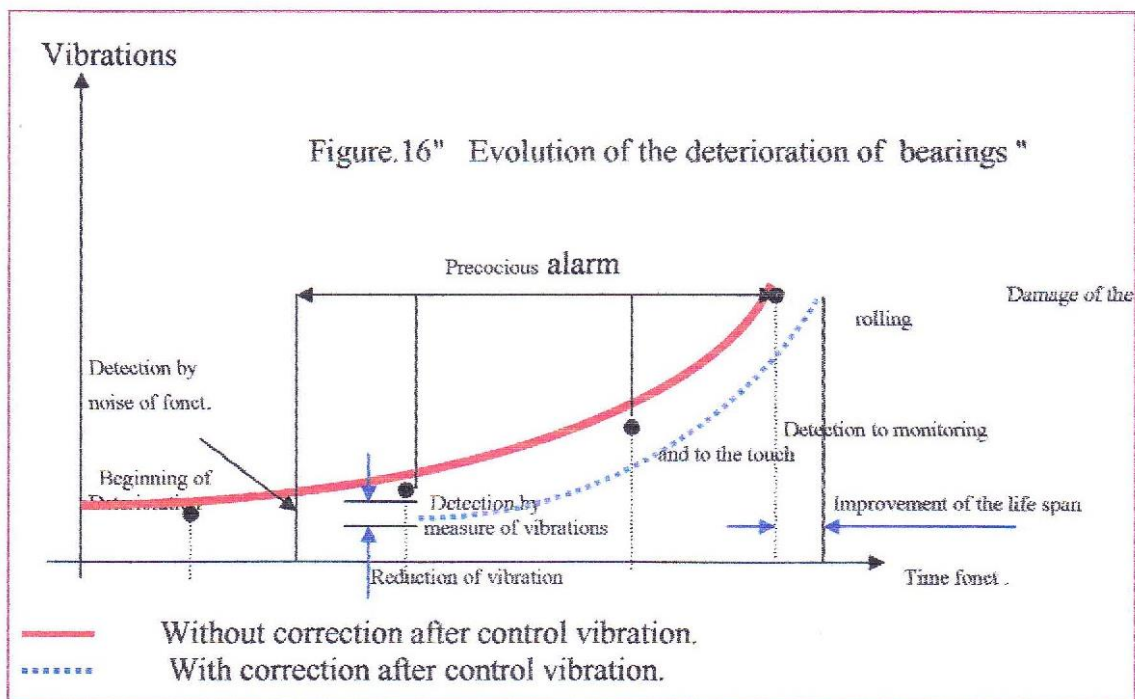
Le pic 2 (BCU) : (75 ; 0,1999)

Donc, d'après le spectre en (BCU), on peut conclure que le défaut affectant ce roulement est un défaut sur la bague interne et un défaut moins grave sur la bague externe.

VI -6-Détermination de l'état des roulements:

L'objectif est de garantir une longue durée de vie des roulements, pour cela il est nécessaire de déterminer l'état de ces pièces en particulier et les machines en général pendant leurs fonctionnements. Sachant qu'une bonne maintenance préventive réduira les coûts de la maintenance.

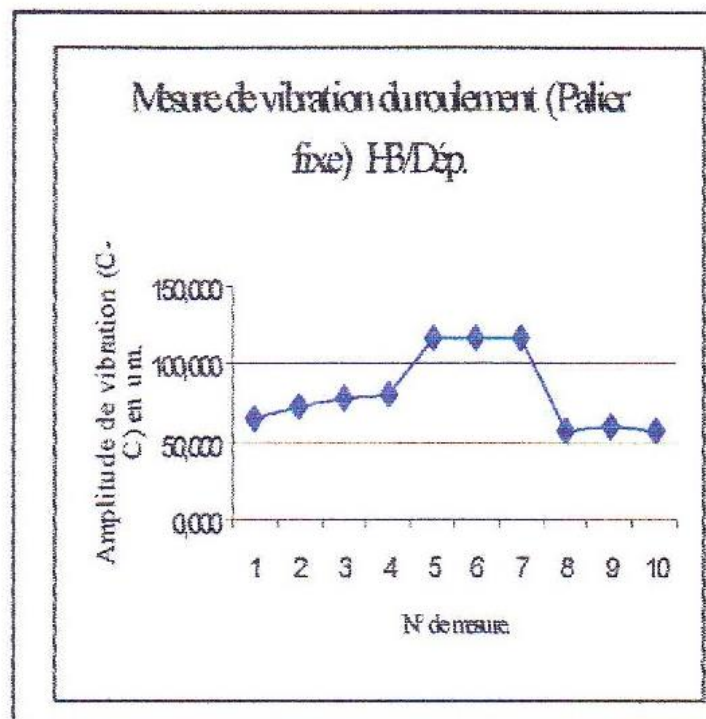
En se limitant sur l'étude de la nouvelle technique du constructeur SKF [11] qui couvre les principaux paramètres et permet de mesurer et contrôler l'état d'une machine (composée de deux ou plusieurs roulements) (figure 16) contre les différents phénomènes qui peuvent intervenir directement sur ces pièces tels que (Le bruit, la température, la vitesse, la vibration, l'alignement et l'état du lubrifiant), afin d'obtenir des performances optimales.



La maintenance conditionnelle permet non seulement d'établir le diagnostic sur l'état d'une machine à un instant donné, mais aussi et surtout, elle donne les éléments nécessaires pour en prévoir l'évolution.

VI -7-Suivi de la deterioration d'un roulement par mesure vibratoire :**Tableau -1 :Reference du roulement: 22309CK, a double rangees de billes.**

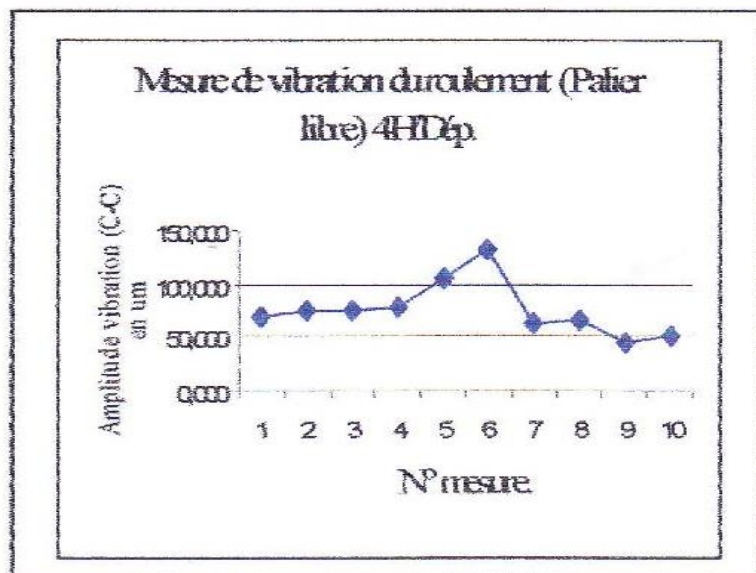
Désign. Palier 4510 / 3H / Déplacement			
	N°	Mesure C,C en μm	Vibration admissible (10 : 70) μm .
Ventilateur : Radial Puissance : 18.5 Kw Vitesse : 2950 tr/mn	1	64.000	
	2	72.000	Serrage du palier.
	3	76.900	
	4	79.000	
	5	116.699	
	6	116.699	Excès de graisse.
	7	115.599	Renouvellement de grs.
	8	58.099	
	9	60.200	
	10	57.500	



Lors d'une renouvellement de graisse pour un roulement à double rangee de billes (palier fixe) on voie que l'amplitude crete a crete diminue de 115.599 μm à 58.099 μm avec un seuil d'alarme superieure 70 μm .

Tableau-2 .Référence du roulement : 22309CK à double rangees de billes.

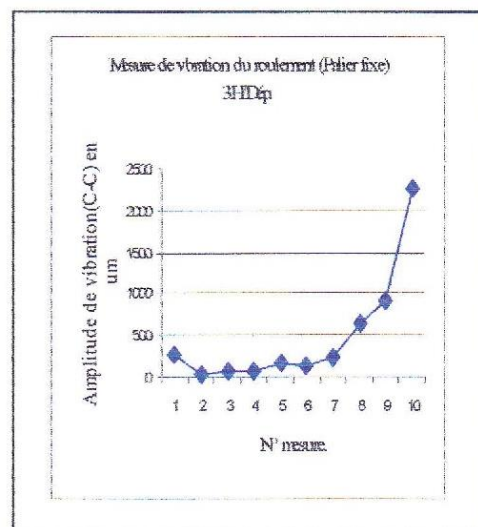
Désign. Palier 4510 / 4H / Déplacement			
	N°	Mesure C,C en μm	Vibration admissible (10 : 70) μm .
Ventilateur : Radial Puissance : 18.5 Kw Vitesse : 2950 tr/mn	1	69.900	
	2	76.300	Contrôle du palier.
	3	74.000	
	4	76.900	
	5	106.400	
	6	130.600	
	7	65.400	Renouvellement de grs.
	8	62.000	
	9	45.799	
	10	51.599	



Lors d'une renouvellement de graisse pour un roulement a double rangee de billes (palier libre) on voit que l'amplitude crete à crete diminue de 65.400 μm à 62.000 μm avec un seuil d'alarme supérieure 70 μm .

Tableau 3 : Réference du roulement .22324CK à double rangees de rouleaux

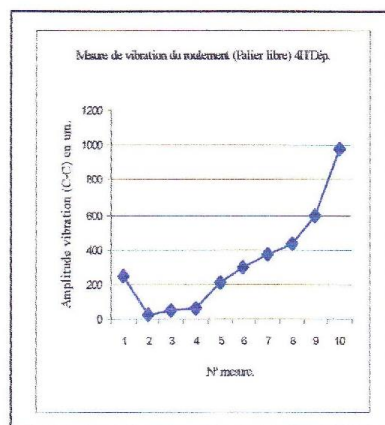
Désign. Palier 4521 / 3H / Déplacement			
	N°	Mesure C,C en μm	Vibration admissible (60 : 220) μm .
Ventilateur Radial Puissance : 200Kw Vitesse : (0 :1500)tr/mn	1	262.399	Serrage du palier.
	2	25.500	
	3	66.199	
	4	71.099	
	5	172.500	
	6	137.800	Serrage du palier.
	7	227.000	Graissage.
	8	647.000	
	9	916.000	
	10	2256.00	Balourd (Equilibrage)



Lors d'une serrage du palier pour un roulement a double rangee de rouleaux (palier fixe) on voie que l'amplitude crete a crete diminue de 262.399 μm à 25.500 μm avec un seuil d'alarme superieure 220 μm .

Tableau -4 : Reference du roulement : 22324CK, à double rangees de rouleaux.

Désign. Palier 4521 / 4H / Déplacement			
	N°	Mesure C,C en μm	Vibration admissible (60 : 230) μm .
Ventilateur Radial Puissance : 200Kw Vitesse : (0 :1500)tr/mn	1	248.300	Serrage du palier.
	2	26.700	
	3	52.980	
	4	59.380	
	5	206.399	
	6	302.500	Serrage du palier.
	7	377.000	Graissage.
	8	431.000	
	9	593.000	
	10	977.000	Balourd (Equilibrage)



Lors d'une serrage du palier pour un roulement a double rangee de rouleaux (palier libre) on voie que l'amplitude crete à crete dirminue de 248.300 um 26.700 um avec un seuil d'alarme superieure 230 um.

Conclusion :

Les resultats de mesure montrent un dépassement de seuil d'alarme pour cela il est nécessaire de distinguer d'une part les méthodes d'évolution qui en une seule mesure conduisent a un diagnostic sur l'état du roulement et d'autre part les méthodes de suivi de tendance et de comparaison avec une valeur moyenne.

L'amplitude de l'impulsion quantifie l'intensité du choc , elle est fonction de la vitesse de rotation' des jeux mécaniques ; du défaut et de l'état de charge

La fréquence du dégât est fonction de la geometrie du roulement et de la vitesse de rotation de l'arbre.

Les incidents de roulements se classent en trois catégories principales suivant qu'ils sont dus à des defauts de fabrication, des erreurs de montage ou une lubrit1cation insufflant. La surveillance de ces machines tournantes consiste a suivre l'état de marche de la machine et pour cela en utilise un logiciel VIBROEXPERT qui va relever la mesure au niveau des paliers (fixe et libre) permettant de qualifier un etat general ; par comparaison a des normes ou a des mesures anterieurs et donne l'analyse spectrale permettant de diagnostiquer l'origine d'un problème et de suivre leur évolution en fonction du temps.

Conclusion générale

Les roulements sont des éléments sensibles dans les machines, qui ne permettent pas de fluctuation excessive de la charge, température, vitesse, vibration.

L'usure trop rapide est coûteuse à nos entreprises, nous a incité à se pencher d'une façon plus proche sur l'étude de ce phénomène, en vue d'améliorer la durée de vie.

Ceci nous a conduits à considérer:

- La probabilité de survie des roulements.
- Reconsidérez les charges appliquées.
- Influence du type de graissage.

L'étude statistique a révélé en premier lieu, que les avaries sont due principalement au montage, on déduit la non qualification des ouvriers et l'inexistence du matériel spécifique au montage et démontage des roulements. Le non respect du type de graissage spécifique au roulement diminue aussi de la durée de vie. Enfin on peut dire à travers ce travail qu'il existe d'autres moyens d'évaluation de la durée de vie d'une manière pratique en faisant appel à l'outil statistique. L'étude vibratoire au niveau des paliers a mis en évidence l'origine de la défaillance en examinant le spectre et ainsi prévoir la durée de vie.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] SKF , assistance technique , Les lubrifiants et les outils SKF .
pour fonctionnement sans problème, avril 1999,
- [2] Fabien Bogard -Mise en œuvre d'une méthodologie numérique dans
le cadxe
du suivi de défauts par analyse vibratoire - Mécanique et industries
2002
- [3] SKF - Les roulements - technologie , calcul et dimensions 1980
- [4] Guide du dessinateur industriel A. CHEVALIER Edition 1979
- [5] FAG - Rolling bearings ball bearings roller bearings housings
accessories
catalogue WL 41,520 / 2 EA Edition 1997
- [6] R . LEFEVRE - Lubrification et turbotechnique volume 1, 1990 [
- 7] Pratique de la maintenance industrielle - les référentiels Dunod
Avril 2000
- [8] Technique de l'ingénieur , B5 page 5370 Avril 2002
- [9] Vibrations Equilibrage sur site , Applications à la maintenance
conditionnelle SCHENCKS.A Février 1994
- [10] A, BÛULENGER et CH. PACHAUB - Surveillance des
machines par analyse des vibrations - AFNOR 1998
- [11] R. B1GRET - J , - L, FERON - Diagnostic - Maintenance -
Disponibilités des machines tournantes - modèles - mesurages -
analyses des vibrations MASSON 1996
- [12] SKF - Les outils de la maintenance Avril 1998
- [13] Thèse de doctorat de Mr Benlali Octobre 2009