

Université du 8 mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique

598



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Spécialité : Maintenance Industrielle

Présenté par : OUACHEM Nasreddine & BOULAKTOUT Bilel



Apport des indicateurs scalaires

Dans la maintenance prédictive des roulements



Sous la Direction de :

Dr DJEBALA Abderrazek

Année universitaire 2010/2011

Remerciements



Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer notre projet de fin d'études.

Nous remercions Dr. Abderrezak Djebellah pour son excellent encadrement, sa vision objective, sans précédent sur tous les aspects concourants à la bonne réalisation de notre projet.

Nos remerciements aux membres du jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Sans oublier au passage, tous ceux qui, de près ou de loin ont contribué à l'affinement de notre projet.



Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à ma famille qui ma soufflé la
notion d'être un homme .*

*A la boussole de ma vie mon père BOUAITA qui ma
m'indique toujours le nord.*

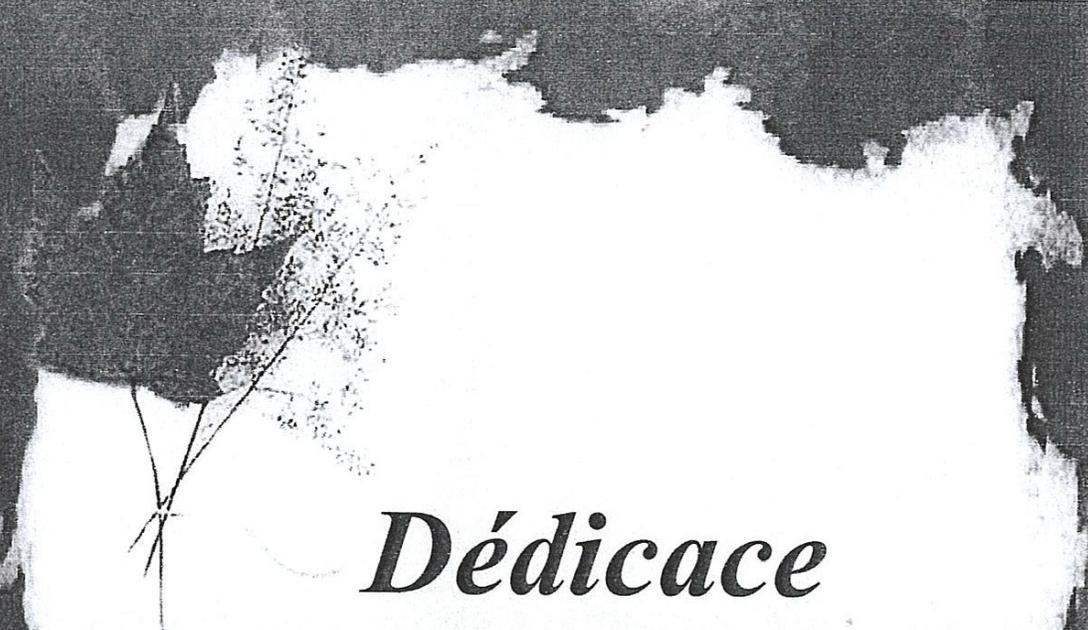
*A les gens de bien qui j'ai rencontré pondent ma scolarité à
l'école de la vie .*

*A mes collègues Nouh, Hakim, Raouf
Rabah*

*A mes amis Bakar, Housseem, Aissa, Amir, Hamta , Zohir
Et bien sûre mon amie intime Zaki*

*A toutes les hommes de l'ombre qui brûlent en silence, pour
éclaircies la bûmes humaine et fondé un monde juste et lib*

BOULAKTOUT Bilel



Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à ma famille qui ma soufflé la
notion d'être un homme .*

*A la boussole de ma vie mon père AISSA qui ma m'indiqu
toujours le nord.*

*A les gens de bien qui j'ai rencontré pondent ma scolarité à
l'école de la vie .*

A mes collègues Nouh, Hakim, Raouf

Rabah

*A mes amis Malek, Skander, Rachid, Badri, Bakar, Houssein,
Aissa, Amir, Hamta ,*

*A toutes les hommes de l'ombre qui brûlent en silence, po
é... eies la bûmes humaine et fondé un monde juste et lib*

OUACHEM *So. Ser. Eddine*

© Ledia Lynn

SOMMAIRE



• Introduction	page01
I. Notions fondamentales sur la maintenance	page02
I.1 Définition de la maintenance	page02
I.2 Objectifs de la maintenance	page02
I.3 Politiques de Maintenance	page03
I.4 Les différents niveaux de maintenance	page06
II. Analyse vibratoire	page08
II.1 Approches de maintenance conditionnelle	page08
II.2 Images vibratoires des différents défauts	page08
II.3 Les défauts de roulements	page12
II.4 Méthodes de détection des défauts de roulements	page17
II.5 Les indicateurs scalaires	page23
III. Etude de la sensibilité des indicateurs scalaires	page27
III.1 Formulation du modèle	page27
III.2 Sensibilité des indicateurs scalaires dans le cas sans défaut	page29
III.3 Influence des différents paramètres sur la sensibilité des indicateurs scalaires dans le cas d'un défaut	page33
III.4 Conclusion du chapitre	page53

IV. Validation expérimentale	page54
IV.1 Démarche expérimentale	page54
IV.2 Résultats expérimentaux	page58
IV.3 Comparaison entre les quatre indicateurs	page66
IV.4 Conclusion du chapitre	page67
• Conclusion générale	page68
• Références bibliographiques	page69

Introduction générale

Les mesures vibratoires représentent l'image des défauts générés, s'ils sont stratégiquement bien placés. Le choix du type d'analyse (temporel, fréquentiel, etc.), permettant le traitement des signaux vibratoires acquis, est très important car il dépend du comportement dynamique de la machine (linéaire, non linéaire, transitoire, stationnaire, ...).

De nombreuses études élaborent des techniques avancées en traitement du signal vibratoire pour la détection des défauts de composants mécaniques. Parmi celles en plein essor, les indicateurs scalaires qui permettent de travailler en temps et dont la sensibilité dépend de plusieurs paramètres. Ces indicateurs sont rapides, fiables et

Adonnent un premier verdict sur l'état du roulement dans avoir recourt à une analyse détaillée.

Les roulements sont des éléments essentiels dans une machine tournante. En effet, les pistes de roulement, chargées cycliquement, se dégradent par fatigue conduisant aux écaillages puis à la ruine du matériau. Lors de la mise en rotation, un train d'impulsion est généré par le défaut à une fréquence bien définie que l'on appelle "fréquence caractéristique" de défaut du roulement. Ce signal périodique est l'objet de l'application de nombreuses méthodes de détection de défaut.

Le mémoire est organisé de telle sorte à offrir, en plus des différents résultats de simulation et d'expérience, un support théorique considérable en s'efforçant de donner plus amples explications par des exemples réels. Le mémoire comporte deux chapitres de synthèse bibliographique, un chapitre de simulation numérique et un chapitre de validation expérimentale ainsi qu'une conclusion générale.

Chapitre I
Notions fondamentales sur
La maintenance

Chapitre I

Notions fondamentales sur la maintenance

I.1 Définition de la maintenance

Selon l'AFNOR (X 60-010) « *La maintenance es définie comme étant l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un dispositif, un équipement ou un système dans des états spécifiques ou en mesure d'assurer un service bien déterminé* ».

La maintenance est aussi l'ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management [Duc 05].

I.2 Objectifs de la maintenance

C'est la nature de l'entreprise qui dicte les objectifs du service de maintenance clairement définis par une politique bien déterminée à partir de la prise en compte de trois facteurs essentiels [Dje 08], [Mon 95], [Lyo 91] :

I.2.1 Objectifs techniques (opérationnels)

- Maintenir l'équipement :
 - a. Dans les meilleures conditions possibles
 - b. Dans un état acceptable
- Assurer la disponibilité maximale des installations et de l'équipement à un prix rationnel ;
- Fournir un service qui élimine les pannes à tout moment et à tout prix ;
- Pousser à la dernière limite la durée de vie de l'installation (notion de durabilité) ;
- Assurer une performance de haute qualité ;
- Maintenir une installation d'une propreté absolue a tout moment.

I.2.2 Objectifs économiques (financiers)

- Réduire au minimum les dépenses de maintenance et maximiser les profits ;
- Assurer le service de maintenance dans les limites d'un budget ;

- Avoir des dépenses de maintenance portant sur le service exigé par les installations et l'appareillage en fonction de son âge et de son taux d'utilisation.

1.2.3 Objectifs humains et écologiques

- Réduire les accidents de fonctionnement (Notion de sécurité) et améliorer les conditions de travail ;
- Etudier toute modification, protection à effectuer sur les matériels pour diminuer les risques d'accidents ;
- Lutter contre la nuisance et préserver l'environnement (échappement de gaz, bruits inhérents, fuites d'huile... etc.).

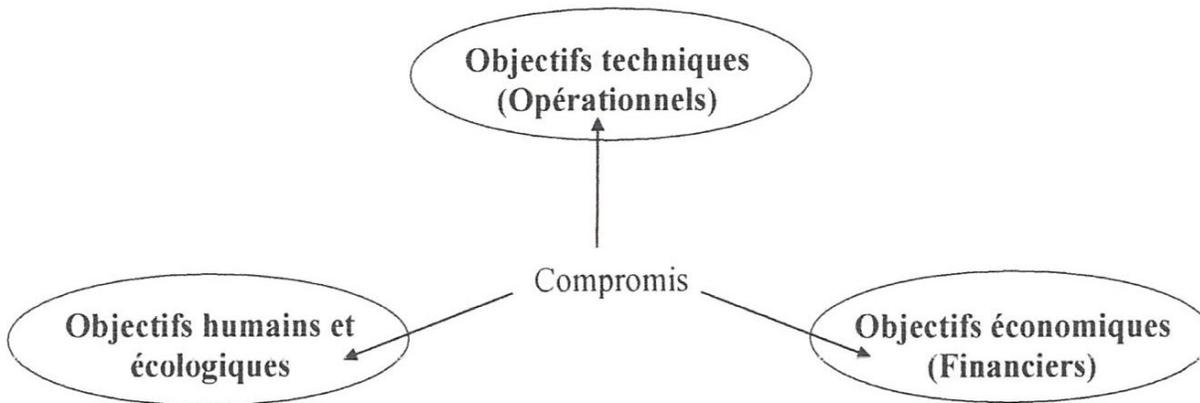


Figure 1.1 : Objectifs de la maintenance

I.3 Politiques de Maintenance

Le choix d'une politique de maintenance traduit la stratégie de l'entreprise qui a fixé certains objectifs, tels que [Bou 09] :

- Réduction des périodes d'indisponibilité des matériels ;
- Réduction des coûts de maintenance ;
- Amélioration de la qualité du produit ;
- Assurer la plus grande sécurité possible dans l'exploitation des matériels.

Cette stratégie doit être fondée sur [Dje 08] :

- La connaissance technologique des biens concernés ;
- Leurs conditions d'exploitation dans le système productif ;
- Leur criticité dans le processus de production ;
- Les coûts directs et indirects engendrés.

En général et ceci depuis les premières normes de maintenance, les politiques peuvent être classées en deux catégories : la première est une maintenance exécutée après la détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise, appelée maintenance corrective. La deuxième est une maintenance destinée à réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation du fonctionnement d'un bien, appelée maintenance préventive.

Le choix entre ces deux politiques est un mélange harmonieux entre préventif et correctif afin de minimiser le coût total de maintenance comme montré dans la figure (1.2) [Mor 05].

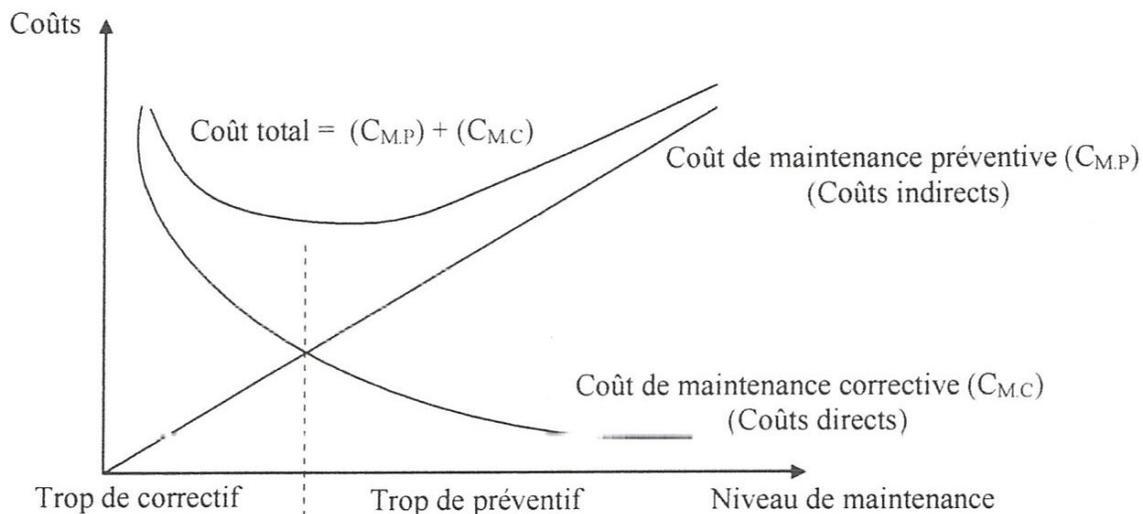


Figure 1.2 : Politiques maintenance

1.3.1 Maintenance préventive

Telle que définie dans la norme précitée, la maintenance préventive est « *la maintenance destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien* ». A partir de cette définition générale on distingue trois variantes [Ber 05] :

- Maintenance préventive systématique
- Maintenance préventive conditionnelle
- Maintenance préventive prévisionnelle

1.3.1.1 Maintenance préventive systématique

Selon l'AFNOR : « *Maintenance effectuée selon un échéancier établi selon le temps ou un nombre prédéterminé d'unités d'usage* ».

1.3.1.2 Maintenance préventive conditionnelle

Cette maintenance est définie comme étant celle que l'on réalise uniquement lorsque l'état du bien le nécessite. La conséquence immédiate est qu'il est nécessaire de savoir mettre en place des techniques du bien (faisabilité technique et économique) et surtout d'être capable de qualifier de façon précise l'état de ce bien. Un certain nombre de paramètres techniques significatifs de l'état du bien doivent donc être définis au cas par cas. Lorsque cela est possible (car ce n'est pas toujours le cas !) on arrive à optimiser les interventions de maintenance préventive en intervenant lorsque cela s'avère nécessaire. On peut schématiser ce processus en disant que l'intervention doit se réaliser lorsque le voyant rouge s'allume sur le tableau de bord. Cela pose cependant un autre problème définis c'est un écueil qui limite considérablement l'application de cette méthode donc réservée la plupart du temps à des biens dont la technologie et le comportement en exploitation sont parfaitement connus. Les exemples les plus classiques des techniques utilisées pour mettre en place la maintenance conditionnelle sont la thermographie infrarouge, l'analyse des lubrifiants et la mesure des vibrations [Ber 05].

1.3.1.3 Maintenance préventive prévisionnelle

Parfois appelée « maintenance prédictive », la maintenance prévisionnelle est, selon l'AFNOR, « *Maintenance exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien* ». Elle est basée sur l'analyse de l'évolution des paramètres techniques qui permettent de quantifier l'état du bien et de déceler les dégradations potentielles dès leur apparition, elle permet d'anticiper et de prévoir au mieux le moment où l'intervention devra être réalisée.

1.3.2 Maintenance corrective

Selon la norme AFNOR « *Ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, ou mois provisoirement, ces activités comportent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, le contrôle du bon fonctionnement* ». Elle se subdivise en deux types :

1.3.2.1 Maintenance palliative (Dépannage)

C'est une remise en état de fonctionnement effectuée parfois sans interruption du fonctionnement de l'ensemble concerné. Elle a un caractère « provisoire » et doit être suivie par une action corrective durable [Dje 08], [Mon 95].

1.3.2.2 Maintenance curative

Il s'agit des réparations faites in-situ ou en atelier central parfois après dépannage, ce type de maintenance a un caractère « définitif » [Dje 08], [Mon 95]. La figure (1.3) résume les types (ou politiques) de maintenance.

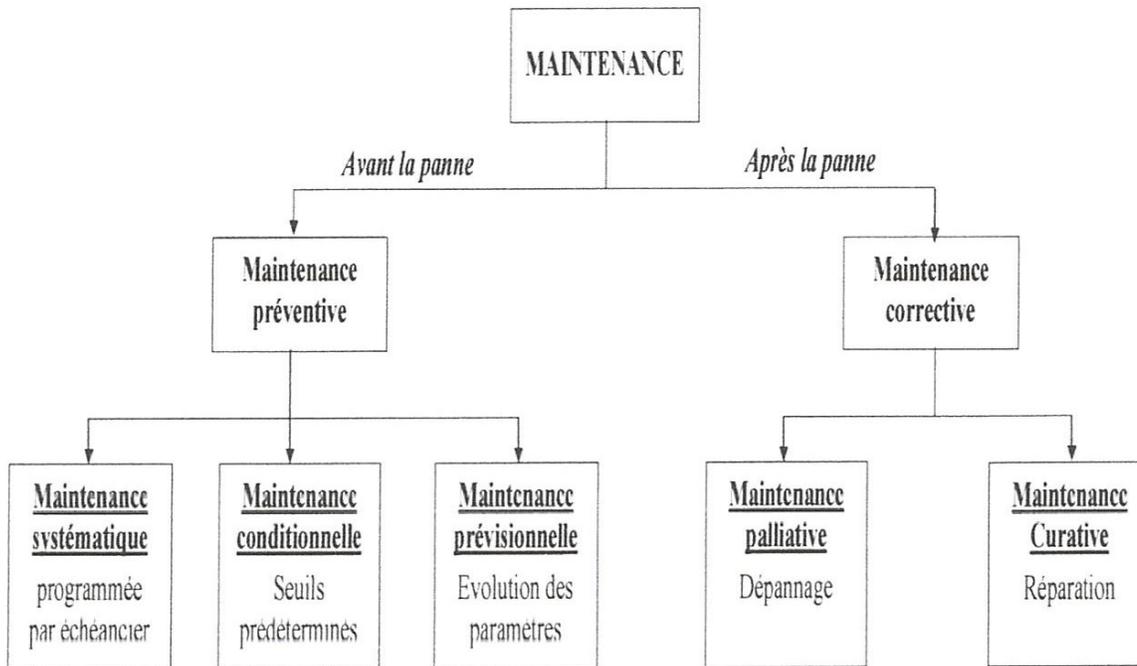


Figure 1.3 : Les différents types de maintenance

I.4 Les différents niveaux de maintenance

La norme X 60-010 distingue 5 degrés de maintenance, classés de manière croissante, selon la complexité des interventions à effectuer [Oli 10].

I.4.1 Maintenance 1er niveau

Les actions de maintenance premier niveau sont des actions simples nécessaires à l'exploitation et réalisées sur des éléments facilement accessibles, en toute sécurité, à l'aide d'équipements de soutien intégrés au bien.

Ce sont par exemple les réglages et contrôles ou inspections nécessaires à l'exploitation, les opérations élémentaires de maintenance préventive, le remplacement d'articles consommables ou d'accessoires (fusibles, ampoules, ... etc.).

Ce type d'opérations peut être effectué par l'exploitant du bien avec les équipements de soutien intégrés au bien et à l'aide des instructions d'utilisation.

1.4.2 Maintenance 2ème niveau

Le deuxième niveau de maintenance concerne les actions qui nécessitent des procédures simples et/ou des équipements de soutien (intégrés ou extérieurs) d'utilisation et de mise en œuvre simples.

Ce sont par exemple les contrôles de performances, certains réglages, les réparations par échange standard de sous-ensembles dont le remplacement est aisé.

Ce type de maintenance peut être effectué par un personnel habilité avec les procédures détaillées et les équipements de soutien définis dans les instructions de maintenance.

Sont ainsi concernées par ce niveau les opérations de remplacement de pièces n'entraînant pas de démontage global de l'équipement. C'est donc un travail portant sur des éléments isolés ou des opérations de vérification de résultats tels que le contrôle des performances du matériel livré.

1.4.3 Maintenance 3ème niveau

Le troisième niveau concerne les opérations qui nécessitent des procédures complexes et/ou des équipements de soutien, d'utilisation ou de mise en œuvre complexes.

Ce sont par exemple les réglages généraux, les opérations de maintenance systématique délicates, les réparations par échanges de composants.

Ces opérations nécessitent une approche globale du fonctionnement de l'équipement, c'est à dire la prise en compte de plusieurs éléments, de leurs interactions et de leur cohérence.

1.4.4 Maintenance 4ème niveau

Le quatrième niveau concerne les opérations dont les procédures impliquent la maîtrise d'une technologie particulière et/ou la mise en œuvre d'équipements de soutien spécialisés, les vérifications d'appareils de mesure.

1.4.5 Maintenance 5ème niveau

Activités de rénovation ou de reconstruction dont les procédures impliquent un savoir-faire faisant appel à des techniques ou technologies particulières, des processus et/ou des équipements de soutien industriels.

Chapitre II
Analyse vibratoire

Chapitre II

Analyse vibratoire

II.1 Approches de maintenance conditionnelle

Dans le cadre de la maintenance préventive conditionnelle, l'analyse vibratoire est une technique très répandue. Elle est réalisée par l'analyse de signaux recueillis sur le système en fonctionnement. Les capteurs adéquats, tels que les accéléromètres piézoélectriques, sont facilement positionnables et de ce fait n'engendrent pas de grandes contraintes de conception du système. L'utilisation des signaux mesurés peut être réalisée à différents niveaux. Certains cas nécessitent simplement un relevé du niveau global et une comparaison avec un seuil. D'autres, exigent une analyse plus fine par outils de traitement du signal afin d'identifier les éléments défectueux par recherche de caractéristiques émergentes comme l'augmentation d'amplitude à une fréquence particulière. Le comportement des machines tournantes, à engrenages et roulements, est de nos jours principalement suivi par analyse vibratoire ou analyse du lubrifiant [Mag 10].

II.2 Images vibratoires des différents défauts

Sur les machines tournantes, les défauts se traduisent par une modulation de l'amplitude ou des fréquences du signal vibratoire, par échauffement excessif de certains de ses organes ou par une usure anormale de ses organes. Les techniques classiques de contrôle permettent de mettre en évidence l'existence de ses phénomènes, mais à un stade relativement tardif. Plusieurs chercheurs ont tout au long de ces dernières années élaboré les signatures vibratoires de la majorité des défauts de machines tournantes [Mor 05], [Mor 92]. Parmi ces défauts on trouve :

II.2.1 Balourd

Il est présent dès lors où l'axe d'inertie (lieu des centres de gravité), est différent de l'axe de rotation de la pièce considérée [Ela 07]. La figure (2.1) montre le schéma d'un balourd couple.

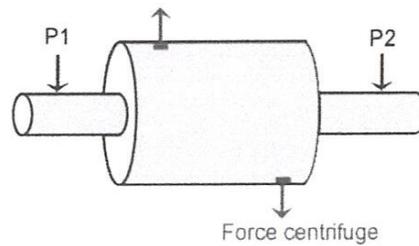


Figure 2.1 : Balourd couple

L'effet centrifuge engendré par le décalage de l'axe d'inertie est de la forme :

$$FC = m \omega^2 R$$

- ✓ m représente la masse excentrée (en kg)
- ✓ ω la vitesse de rotation (en rd / s)
- ✓ R le rayon d'excentration (en m)

La détection avec l'analyse spectrale se traduit par une énergie excessive sur le pic à la fréquence de rotation (Fig. 2.2).

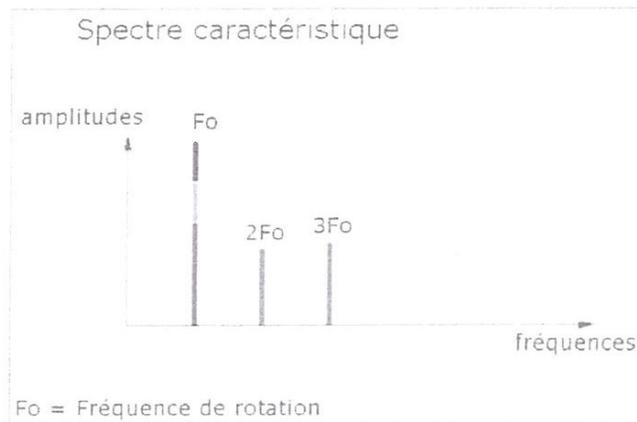


Figure 2.2 : Spectre caractéristique du balourd

II.2.2 Désalignement

Entre arbres en prolongement, le désalignement peut être de plusieurs ordres : axial, radial, angulaire. [Ela 07]. La détection avec l'analyse spectrale se traduit par une énergie excessive sur les harmoniques 2 et/ou 3 de la fréquence de rotation (Fig. 2.3).

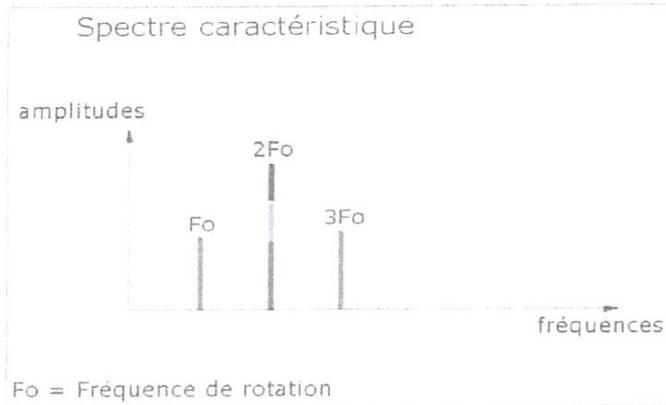


Figure 2.3: Spectre caractéristique du désalignement

II.2.3 Le desserrage des fixations

Par le fait des vibrations générées par la machine considérée ou son environnement, les fixations par lesquelles passent ces sollicitations cycliques, peuvent finir par se relâcher, puis se desserrer par effet de fatigue [Ela 07]. Sur le spectre on constate une énergie excessive à l'harmonique 3. En plus, un déphasage sera mesurable entre le pied de la machine et la fondation (Fig. 2.4).

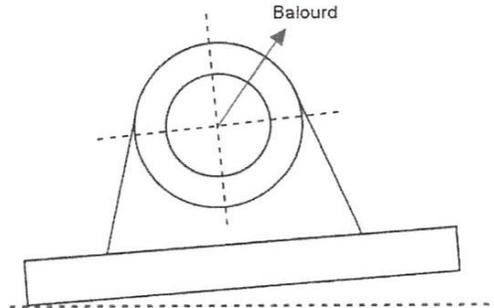


Figure 2.4: Balourd qui provoque le desserrage des fixations

II.2.4 Défauts de courroie

Les défauts de courroies se manifestent soit par un jeu ou une détérioration ou tous simplement suite à une mauvaise qualité.

Le spectre se caractérise par (Fig. 2.5) :

1. Des harmoniques de la fréquence de la courroie F_{cour} (maximum à $2 F_{cour}$).
2. Des pics correspondant à la vitesse de rotation des poulies $\omega r/2$

$$F_{cour} = \pi \omega r \cdot D_{poulie} / L_{cour}$$

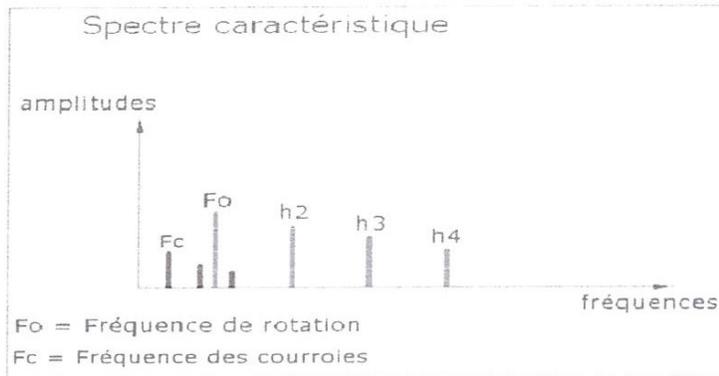


Figure 2.5: Spectre caractéristique du défaut de courroie

II.2.5 Défauts d'engrenages

Les défauts d'engrenages sont dus en majeure partie à des problèmes de lubrification, de fabrication, de fonctionnement. Ils vont se percevoir par une augmentation du niveau global de l'amplitude sur la fréquence d'engrènement F_e [Ela 07].

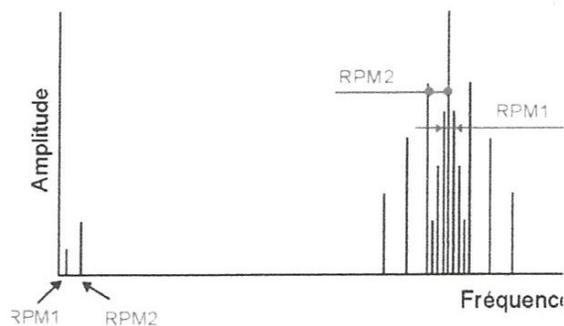


Figure 2.6 : Spectre d'un défaut d'engrenage

RPM 1 est la vitesse de rotation de l'arbre 1

RPM 2 est la vitesse de rotation de l'arbre 2

On constate la présence de bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement F_e , témoignant de la modulation d'amplitude aux fréquences des arbres 1 et 2 (Figure 2.6).

II.2.6 Défauts hydrauliques

La cavitation est la vaporisation d'un fluide sous pression inférieure ou égale à la pression du fluide. Ce phénomène se manifeste par la formation au sein de l'écoulement, de bulles ou des poches de vapeur. Dans les pompes ce phénomène se traduit par des structures de vapeur qui apparaissent dans les ondes de faible pression. A l'entrée des ondes de la roue de la pompe elles sont transportées vers les ondes à

haute pression, sous l'action du gradient de pression ces bulles implosent en libérant des micro-jets (ondes de choc) qui peuvent atteindre des milliers de bars. L'image vibratoire d'un défaut se traduit par une augmentation générale du bruit de fond [Ela 07].

II.2.7 Défauts de roulements

Les roulements sont les éléments mécaniques subissant le plus les phénomènes de fatigue dus aux charges radiales et axiales, fixes ou non, continues ou non, rendus cycliques par le passage des éléments roulants. Ce phénomène conduit normalement à de l'écaillage.

II.3 Les défauts de roulements

En réalité les roulements sont les éléments les plus importants des machines tournantes. Souvent, ils sont soumis à des excitations qui provoquent dans la majorité des cas des défauts cause d'une défaillance partielle ou totale de la machine dont les conséquences sont catastrophiques [Dje 08]. En réalité il est rare que le roulement lui-même soit mis en cause lors d'une défaillance prématurée. Aujourd'hui de nombreuses machines sont équipées de roulements. La durée nominale de fonctionnement d'un roulement est définie, une incertitude souvent impossible à définir, lui est associée.

Trois politiques sont adoptées :

- Au titre d'une maintenance systématique, les roulements après un certain temps de service sont remplacés par roulements neufs ;
- Les roulements sont remplacés lorsque leur destruction se manifeste : c'est la maintenance corrective avec les risques qu'elle comporte, en égard à la machine ;
- Les roulements sont surveillés et remplacés lorsque des descripteurs des états vibratoires qu'ils imposent aux machines dépassent des valeurs fixées : c'est la maintenance préventive conditionnelle.

II.3.1 Manifestation des défauts

1. Ecaillage de fatigue

Ecaillage de fatigue présent sous forme de fissuration et enlèvement de fragment de matière [Mag 10].

2. Ecaillage superficiel

Ecaillage superficiel sous forme de taches en surface provenant d'arrachement superficiel de métal [Mag 10].

3. L'usure

Que les roulements soient lubrifiés ou non, le roulement sans glissement des éléments roulants sur la bague extérieure et intérieure n'est pas assuré, le film fluide peut se rompre et des glissements entraînent l'usure.

Par ailleurs des corps étrangers, poussières, particules introduites au montage ou pendant le fonctionnement, peuvent accroître le jeu et créer des cavités, coincer l'élément roulant et par suite entraîner une rotation des bagues par rapport aux éléments qui les contiennent.

L'usure générée par les corps étrangers peut être réduite par un filtrage à 10 μ m. L'usure peut avoir d'autres sources, elle se révèle par différentes configurations [Mor 92].

4. Piquetage

Un courant peut traverser des éléments d'un roulement, des arcs produisent des points chauds ou des fusions. Par suite de refroidissements rapides, le métal se trempe et des cratères se forment, caractérisés par des taches claires aux bords sombres. Pour des courants faibles, l'altération est moins marquée; elle se traduit par des rainures. [Mor 92].

5. Grippage

Le grippage résulte d'un manque de lubrifiant, les contacts métal-métal entraînent des échauffements qui facilitent les microsoudures et le transfert de métal révélés par des zones aggravantes. Une graisse durcie, une usure qui entraîne la rotation des roulements des rouleaux ou des aiguilles autour d'axes non parallèles à l'axe des bagues, peuvent conduire à un grippage [Mor 92].

6. Reptation

La reptation est une rotation de la bague intérieure sur le rotor, elle est due à un jeu. Une usure de la bague et du rotor en résulte, révélée par un polissage ou par des stries [Mor 92].

7. Faux brinellage

Le faux brinellage peut affecter les roulements au repos et les roulements dont les bagues tournent à la même vitesse. C'est une usure par petits débattements qui cassent le film et conduisent à un contact métal-métal. Des microsoudures et des micro-arrachements en résultent ; les particules s'oxydent et contribuent à une destruction qui

peut être rapide. Des empreintes brillantes ou ternes s'installent au droit des éléments roulants [Mor 92].

8. Déformations

L'indentation peut apparaître, essentiellement sur les bords des pistes, lors du montage du roulement, une force-choc peut conduire à un dépassement de la limite élastique, l'écartement des empreintes est égal à celui des éléments roulants, l'indentation favorise l'écaillage [MOR.92].

9. Ruptures

Elles sont précédées par des craquelures dues à des charges élevées ou à des défauts : porte réduite de la bague extérieure, contrainte pendant l'usinage, elles sont rares. [Mor 92].

10. Corrosion

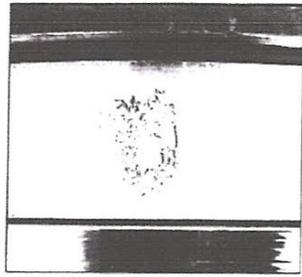
La corrosion chimique se produit en atmosphère humide (saturation) lorsque le roulement est soumis à des phases de fonctionnement et d'arrêt durant lesquelles l'air humide pénètre dans le roulement, des particules oxydées se détachent, l'étanchéité de tels roulements doit être assurée [Mor 92].

La corrosion de contact s'apparente au faux brinellage. Elle apporte une pâte brune formée par la rouille et le lubrifiant, une corrosion profonde entraîne la rupture des bagues, des particules oxydées se détachent.

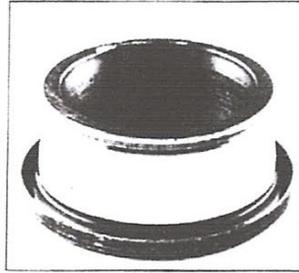
11. Avaries de cage

Les cages sont fragiles. Lors du montage du roulement, elles peuvent subir des déformations susceptibles d'entraîner le coincement des éléments roulants, le montage peut également conduire à leur rupture. Les cages peuvent s'user et provoquer des grippages. [Mor 92].

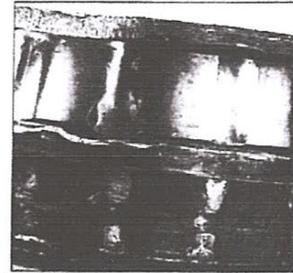
Pour chaque défaut cité, nous présentons une photo correspondante selon SNR (figure 2.7) [SNR 04].



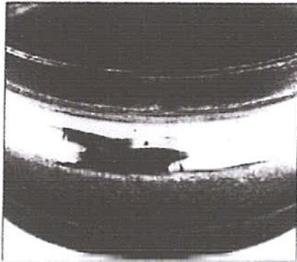
1 Ecaillage de fatigue



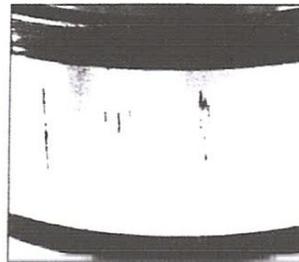
2 Ecaillage superficiel



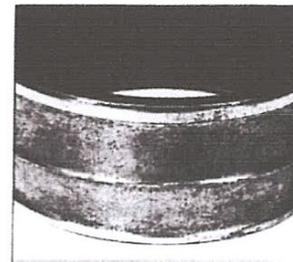
3 Grippage



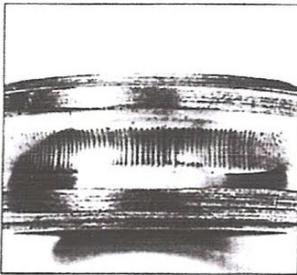
4 Empreintes par déformation



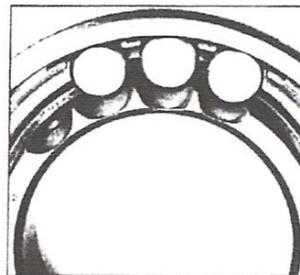
5 Faux effet BRINELL



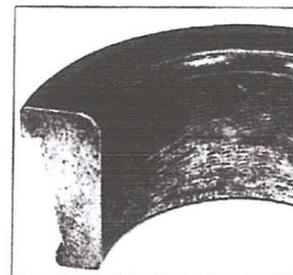
6 Usure



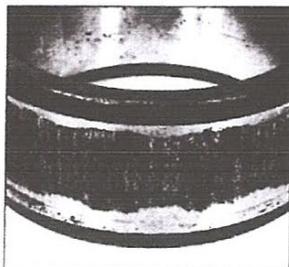
7 Cratères et cannelures



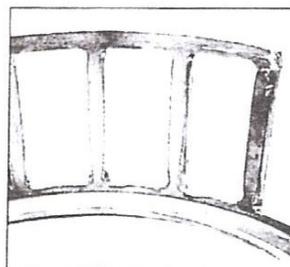
8 Coups, fissures, cassures



9 Corrosion de contact



10 Corrosion



11 Détérioration des cages

Figure 2.7 : Principaux aspects de la détérioration des roulements [SNR 04]

II.3.2 Apparition d'un défaut sur le signal vibratoire

Les signaux vibratoires relevés sur les systèmes mécaniques en fonctionnement contiennent l'information nécessaire relative à l'état des composants de la machine mais tout le problème consiste à isoler l'information relative à chaque élément. Les vibrations générées au sein d'un roulement sont de faible amplitude, ressemblant à un bruit aléatoire. Lors de l'apparition d'une avarie, une impulsion se produit chaque fois que le défaut participe à un contact. L'avarie a donc une fréquence caractéristique qui dépend de la géométrie du roulement et de l'emplacement de l'écaillage (sur la bague intérieure, sur la bague extérieure, ou sur un élément roulant) [Bre 02].

Malheureusement ces impulsions sont souvent noyées dans le bruit aléatoire ainsi que les autres composantes de la machine, notamment lorsque le défaut est naissant. Pour un défaut de grande gravité, les vibrations induites sont d'un niveau supérieur à ceux des autres composantes (balourd, mésalignement, mauvais serrage, ... etc.) et de ce fait les impulsions sont très claires sur le signal d'accélération. Les figures (2.8.a), (2.8.b) et (2.8.c) représentent respectivement les signaux d'accélération d'un roulement sain, avec un petit et un grand défaut sur la bague extérieure. Les roulements, du type 6200 à une rangée de billes, sont montés sur un banc d'essai et tournent à 30 Hz. Des impulsions, inexistantes dans le cas sans défaut, commencent à naître pour le cas d'un petit défaut et s'accroissent pour celui de grande gravité [Dje 08].

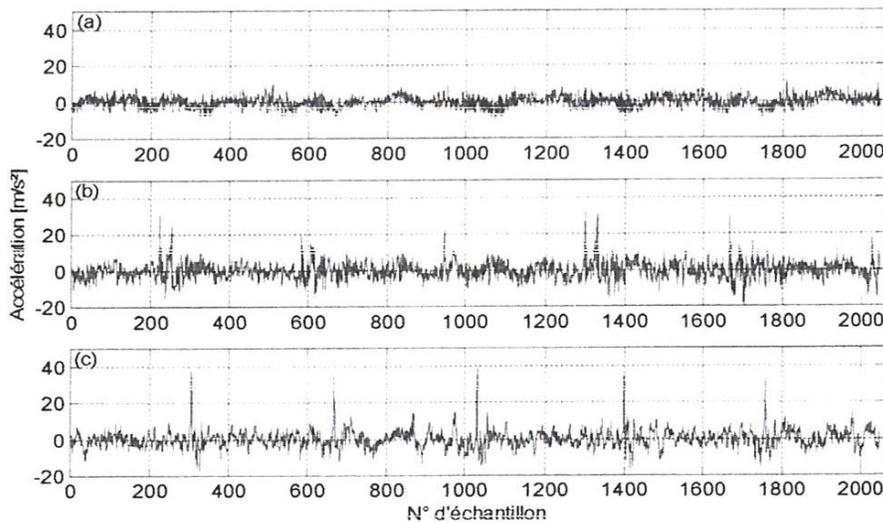


Figure 2.8 : Signaux d'un roulement : (a) sans défaut, (b) avec un petit défaut, (c) avec un grand défaut sur la bague extérieure [Dje 08]

II.4 Méthodes de détection des défauts de roulements

II.4.1 Notions de seuil et d'indicateur

Le dépistage d'anomalies sur une machine nécessite de procéder, au préalable, au choix d'un certain nombre d'indicateurs plus ou moins élaborés dont l'évolution dans le temps, selon le type de suivi choisi, est significative de l'apparition d'une anomalie et de son aggravation. A chaque indicateur, est associé un seuil dont la valeur dépend du type d'anomalie d'une part, et des conditions de fonctionnement de la machine à surveiller d'autre part. Tout dépassement de seuil doit déclencher la mise en œuvre d'une procédure préalablement définie, comprenant un certain nombre d'opérations déterminées en fonction du taux de dépassement : validation de l'alarme, diagnostic plus élaboré, modification de la périodicité et du type de suivi, programmation d'une action corrective, arrêt immédiat de l'installation [Bar 06].

Surveillance = analyse des principales anomalies
pouvant affecter la machine.

Détermination des Indicateurs + Suivi de l'évolution
de la valeur de ces indicateurs

Selon la complexité de la machine surveillée, selon son caractère stratégique pour la production, selon les défauts que l'on veut suivre et selon la fiabilité désirée, on choisira de :

1. Suivre les indicateurs de déplacement, vitesse et accélération :
 - En mode global « large bande »
 - En mode global par bandes de fréquences
2. Suivre la forme spectrale des indicateurs par comparaison avec un gabarit
3. Suivre uniquement les indicateurs spécifiques aux roulements

II.4.2 Suivi des indicateurs spécifiques aux roulements

II.4.2.1 Les outils de surveillance : ce sont des indicateurs (grandeurs physiques) utilisés régulièrement pour surveiller les installations. Leurs évolutions permettent d'alerter d'une dégradation du fonctionnement sans pour autant désigner l'élément défectueux. On distingue :

- Les indicateurs scalaires ou niveaux globaux ;
- Les indicateurs de forme ou spectres.

Ces indicateurs constituent, lors d'une première campagne de mesures réalisée sur la machine en bon état, la signature de la machine. Ils sont présentés en détail dans les paragraphes suivants.

➤ Niveaux globaux (NG)

La surveillance par niveaux globaux offre des possibilités d'investigations limitées. Les niveaux globaux sont des indicateurs scalaires plus ou moins sensibles à un nombre important de phénomènes. Sur une machine dont le niveau vibratoire est relativement haut, le développement d'un défaut mécanique peut être masqué par le bruit de fond. Le niveau global mesuré ne réagit pas à ce défaut, du moins pas à un stade précoce de son développement (Figure 2.9).

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 [Jou 07].

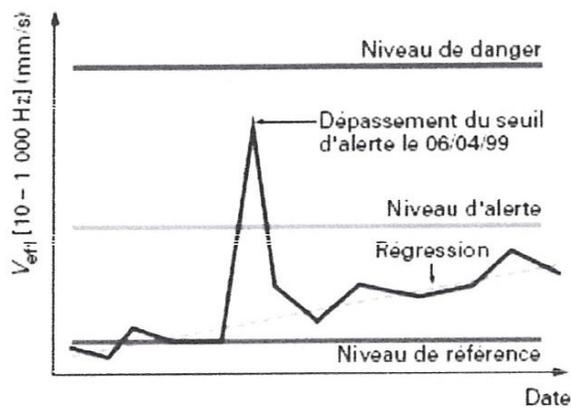


Figure 2.9: Exemple d'utilisation d'un niveau global

➤ Spectre BPC (pourcentage de bande constant)

La technique de surveillance des installations à chaîne cinématique simple (une seule ligne d'arbre) par comparaison de spectres BPC est une technique fiable et rapide. Elle constitue un bon crible (filtrage).

Par contre, contrairement à la surveillance par spectres RC (résolution constante), elle ne donne que rarement des informations précises sur l'origine des évolutions. Le spectre BPC se présente sous forme de « bandes » juxtaposées selon une échelle logarithmique de la fréquence [Jou 07].

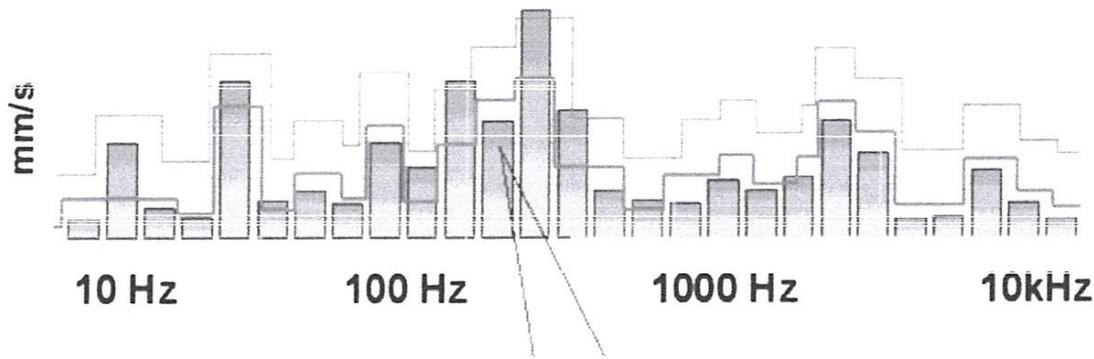


Figure 2.10 : Spectre PBC

II.4.2.2 Les outils de diagnostique

➤ Analyse spectrale

Le diagnostique vibratoire est basé sur l'identification de la fréquence de la vibration générée par un phénomène mécanique (la plupart des fréquences caractéristiques sont proportionnelles à la vitesse de rotation des arbres). La méthode mathématique permet de représenter, en effectuant la transformé de Fourier, le signal complexe de la vibration par un spectre fréquentiel. Selon la nature du signal vibratoire, on obtient un spectre de raies discrètes ou un spectre continu. Le spectre se représente sous forme d'un graphique montrant l'amplitude à chaque fréquence. L'apparition d'un pic sur le spectre, correspondant à l'une de ces fréquences ou de leurs harmoniques, est signe de la présence d'un défaut. Le tableau de la figure (2.11) illustre les expressions mathématiques des différentes fréquences d'apparition des défauts de roulements [Tan 99].

Défaut	Fréquence d'apparition
Bague extérieure	$BPFO = \frac{nN}{2} (1 - \frac{d}{D} \cos \alpha)$
Bague intérieure	$BPFI = \frac{nN}{2} (1 + \frac{d}{D} \cos \alpha)$
Élément roulant	$BPF = \frac{DN}{2d} (1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2 \alpha)$
Cage	$CF = \frac{N}{2} (1 - \frac{d}{D} \cos \alpha)$

Tableau 2.11. Fréquences d'apparition des défauts de roulements

Où D est le diamètre moyen du roulement en mm, α représente l'angle de contact en degré, n le nombre d'éléments roulants et d leur diamètre en mm. Pour des vitesses de

rotation normales, ces fréquences sont dans le rang des basses fréquences. En pratique, elles peuvent être un peu différentes de celles réelles présentes dans le spectre. En plus, les pics correspondants peuvent être modulés de part et d'autre par des bandes latérales [Tan 99]. En réalité, il y a d'autres défauts comme le désalignement du roulement dont les fréquences sont des multiples de la vitesse de rotation. Nous allons nous intéresser uniquement à ceux des quatre familles précédentes.

Pour illustrer l'approche fréquentielle de la détection des défauts de roulements, nous présentons, sur la figure (2.12) le spectre d'un roulement défectueux. Le roulement, à une rangée de rouleaux cylindriques du type Nu 205, est monté sur un tour parallèle et tourne à 34,5 Hz. Sur le spectre apparaît, en plus des composantes fréquentielles du système (vitesse de rotation et ses harmoniques), un pic correspondant à environ 130 Hz qui n'est pas une harmonique de la vitesse de rotation mais une fréquence typique d'un défaut sur la bague extérieure. Cette technique, bien qu'elle soit toujours utilisée notamment dans le cadre d'une surveillance vibratoire, est limitée du fait que certaines fréquences de défauts sont très proches des fréquences d'autres composantes, et se trouvent généralement immergées les unes dans les autres. De ce fait, elles ne sont pas toujours évidentes à détecter par le spectre, la raison pour laquelle on filtre le signal mesuré et on applique ainsi la détection par la méthode d'enveloppe [Dje 08].

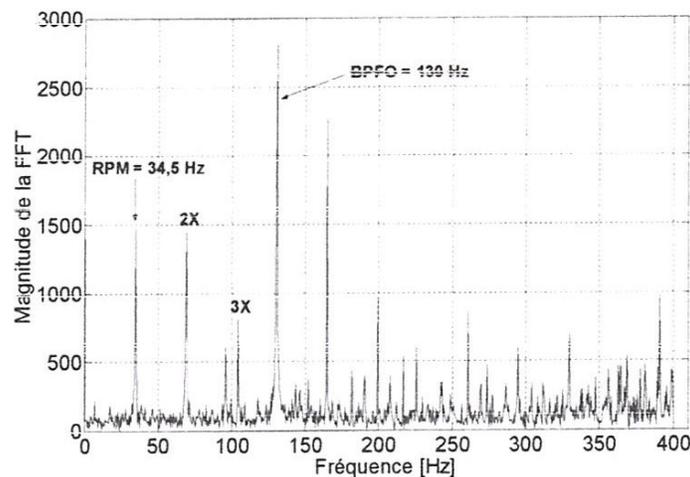


Figure 2.12. Spectre d'un défaut sur la bague extérieure [Dje 08]

➤ Zoom

Un grand nombre d'anomalies mécaniques se manifestent, avec un apport d'énergie faible ou nul, par l'apparition de bandes latérales de modulation autour d'une fréquence cinématique appelée « fréquence porteuse », par exemple (fréquence de rotation, fréquence d'engrènement, fréquence propre), de tels phénomènes ne sont

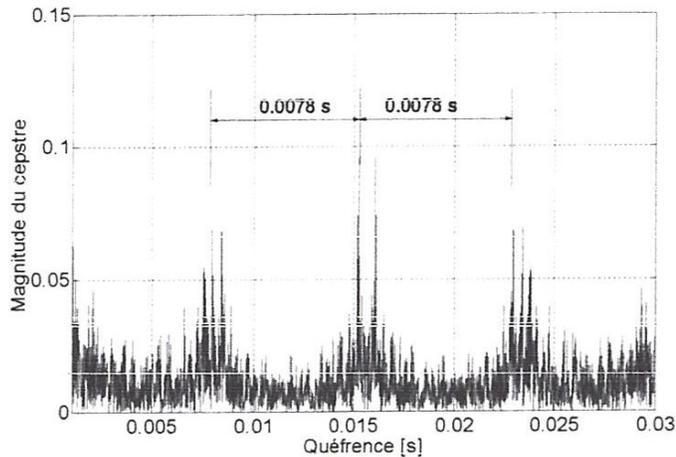


Figure 2.14. Cepstre d'un roulement défectueux [Dje 08]

➤ Démodulation d'amplitude (analyse d'enveloppe)

La démodulation d'amplitude, appelée plus souvent encore détection d'enveloppe, est un outil d'aide au diagnostic très intéressant pour la détection des défauts de roulements. La démodulation d'amplitude permet en effet d'analyser la forme du signal, notamment lorsque le défaut recherché excite un mode de résonance de la structure (par exemple, bagues de roulements, paliers, carters), ce qui est fréquemment le cas en mécanique où beaucoup de défauts engendrent des forces pulsionnelles qui excitent des modes de résonance de la structure bien avant de se manifester à leur propre fréquence cinématique.

La détermination des fréquences de modulation et donc des taux de répétition des chocs, associée à la connaissance de la cinématique de l'installation, permet de localiser, voire de déterminer, l'origine du défaut et cela de façon précoce et rapide, même lorsque le défaut est noyé dans un bruit de fond dû à l'environnement immédiat de l'organe incriminé. La démarche numérique de calcul de l'enveloppe est la suivante : on applique la transformée de Fourier au signal temporel. Le spectre ainsi défini permet d'isoler les résonances du système. Le signal temporel est filtré passe-bande afin d'obtenir un spectre réduit autour de la fréquence principale du système, puis on applique la transformée d'Hilbert puis la transformée inverse de Fourier, on obtient le signal d'enveloppe temporel. Ce signal est rarement directement employé comme outil d'analyse, on utilise plutôt le spectre d'enveloppe [Kba 10]. La figure (2.15) montre l'exemple d'une analyse d'enveloppe d'un roulement défectueux.

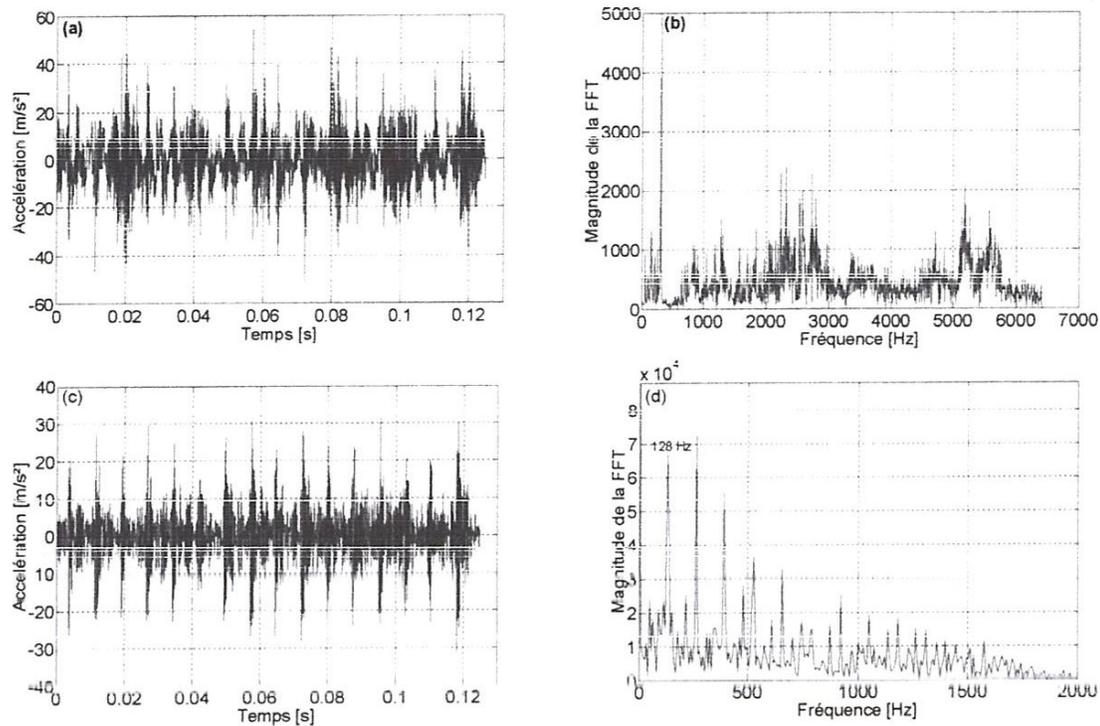


Figure 2.15 : Analyse d'enveloppe d'un roulement défectueux [Dje 08]

➤ Analyse ondelettes

L'analyse par ondelettes est une méthode de traitement de signaux récent qui a fait l'objet de plusieurs applications pour la détection des défauts de roulements. Venant combler les limites de l'FFT, elle est adaptée spécialement pour l'analyse des signaux transitoires. Elle est toujours un domaine de recherche d'actualité dans plusieurs secteurs.

II.5 Les indicateurs scalaires

Comme les indicateurs scalaires sont l'objet de notre étude, nous allons détailler leurs formulations mathématiques.

Un indicateur scalaire associé à un signal vibratoire, observé le plus souvent sous sa forme temporelle sur une durée déterminée en relation avec la cinématique de l'installation, un nombre ou scalaire [Bou 98]. La valeur d'un indicateur peut ne pas avoir une signification intrinsèque mais c'est son évolution dans le temps qui est significative de l'apparition ou de l'aggravation d'un défaut.

Définir un indicateur scalaire dans le domaine temporel nécessite de choisir :

1. Une grandeur cinématique représentative du mouvement vibratoire (accélération, vitesse, déplacement) selon la nature et le type de capteur utilisé ;

2. Une grandeur représentative de l'amplitude du signal (valeur efficace, amplitude crête, facteur de crête, kurtosis...) ;
3. Une bande fréquentielle dans laquelle on veut calculer le paramètre retenu ;
4. Une durée d'analyse afin que le signal pris en considération dans le calcul de la valeur de l'indicateur soit représentatif du mouvement vibratoire de la machine.

Bons nombre de ces indicateurs ont été utilisés pour la détection des défauts de roulements sont toutefois beaucoup de succès [Tan.99]. En réalité ces indicateurs sont proportionnels à l'amplitude du signal vibratoire donc caractérisent seulement sa puissance et non pas sa forme. Les facilités de mise en œuvre, le faible niveau de connaissance requis, le poids des habitudes et ce, en dépit de son fiable degré de fiabilité dès que la cinématique de l'installation devient quelque peu complexe, font que ce mode de surveillance est à ce jour de beaucoup le plus utilisé.

II.5.1 Suivi des indicateurs spécifiques aux roulements

La plupart des défauts affectant les roulements (écaillage, indentation, manque de graisse, jeux trop importants, ... etc.) se traduisent par une perte de matière. Comme il s'agit généralement de chocs périodiques ou aléatoires de très courte durée, la plage des fréquences dans laquelle se situent toutes les composantes élémentaires du phénomène vibratoire peut atteindre plusieurs centaines de kilohertz. Afin d'isoler ces défauts (généralement des défauts de roulements, mais aussi des défauts de dentures, des jeux de clavettes.), de l'ensemble des phénomènes qui peuvent provenir de l'état de la machine, on peut utiliser des techniques simples de dépistage spécifique reposant sur la mesure globale des indicateurs suivants : le kurtosis et le facteur de crête.

➤ Facteur de crête

Un roulement neuf ou en bon état génère une vibration de faible amplitude, aussi bien en valeur crête qu'en valeur efficace (ou RMS). Le facteur de crête, rapport entre ces deux valeurs, reste donc faible, généralement compris entre 3 et 6.

$$\text{Facteur de crête} = \frac{\text{valeur crête}}{\text{valeur efficace}} = \frac{\text{Sup} |S_k| \text{ avec } 1 \leq k \leq Ne}{\sqrt{\frac{1}{Ne} \sum_{k=1}^{Ne} (S_k)^2}}$$

➤ Kurtosis

Le kurtosis vient du mot grec *kyrtosis* qui veut dire aplatissement ou *convexity* en anglais [Sei 03]. Pour un roulement sain la distribution des amplitudes du signal est

Gaussienne, le kurtosis est voisin de trois. Pour un roulement dégradé, présentant des écaillages, des indentations ou des jeux importants, l'allure de la distribution de l'amplitude du signal est modifiée et le kurtosis est supérieur ou égal à 3.

$$Kurtosis = \frac{M_4 S(t)}{M_2^2 S(t)} = \frac{\frac{1}{Ne} \sum_{k=1}^{Ne} (S_k - \tilde{S})^4}{\left(\frac{1}{Ne} \sum_{k=1}^{Ne} (S_k - \tilde{S})^2 \right)^2}$$

Où M4 et M2 sont les moments statistiques d'ordre 4 et d'ordre 2 et S est la valeur moyenne des amplitudes.

Dans la pratique, on détermine le kurtosis sur plusieurs bandes de fréquences puisqu'en fonction de l'évolution de la dégradation, le défaut va exciter des modes de résonance dont les fréquences se situent dans des plages de fréquences différentes. Il est bon de noter que dans le cas d'une forte détérioration du roulement, l'allure de la distribution de l'amplitude redevient gaussienne avec le kurtosis voisin de 3, mais aussi une augmentation importante de l'amplitude efficace. Comme pour le facteur de crête, il y a lieu de tenir compte simultanément de l'évolution des deux critères : kurtosis et amplitude efficace. (Figure 2.16).

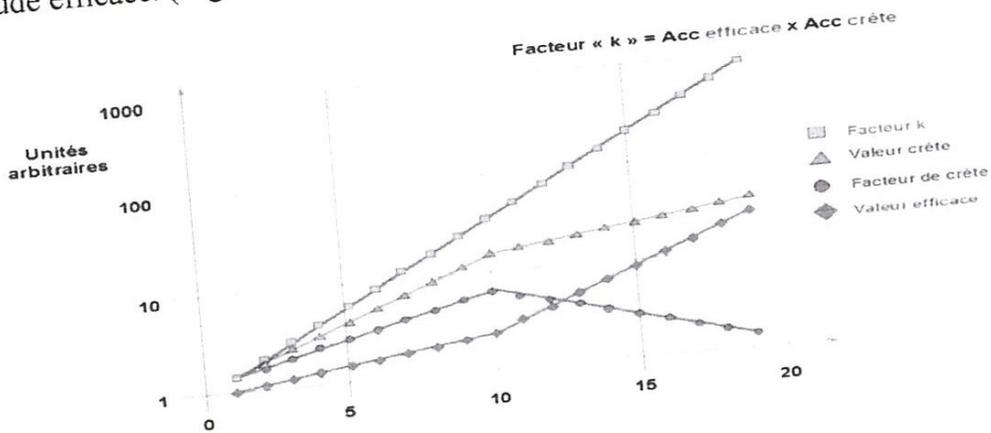


Figure 2.16 : Sensibilité des facteurs

➤ **Facteur de forme et facteur d'impact**

Ces deux indicateurs ne sont pas bien connus dans le domaine de la détection des défauts de roulements. Ils ont été cités dans quelques ouvrages, notamment dans [Sas 04], sans toutefois une étude détaillée sur leurs comportement. L'objectif principal de notre étude est de faire une étude détaillée sur ces deux indicateurs et de fixer des seuils de détection, à l'image du kurtosis et du facteur de crête, et donc leur comparaison avec les indicateurs connus.

Mathématiquement, le facteur de forme (shape factor) est donné par :

$$\text{Facteur de forme} = \frac{RMS}{\frac{1}{Ne} \sum_{k=1}^{Ne} |S_k|}$$

Le facteur d'impulsion (impulse factor) quant à lui est donné par :

$$\text{Facteur d'impact} = \frac{V_c}{\frac{1}{Ne} \sum_{k=1}^{Ne} |S_k|}$$

Chapitre III

Etude de la sensibilité des indicateurs scalaires

Chapitre III

Etude de la sensibilité des indicateurs scalaires

But du chapitre

Ce chapitre concerne l'étude de la sensibilité de plusieurs indicateurs scalaires en particulier deux nouveaux appelés facteur de forme et facteur d'impact ou d'impulsion. Aucune étude détaillée n'a été faite sur ces deux indicateurs, qui seront bien évidemment comparés à ceux bien connus dans le domaine de la détection des défauts de roulements, à l'image du kurtosis et du facteur de crête. Le chapitre comporte, entre autre, la présentation de la mise en équation du modèle mathématique utilisé ainsi que la détermination des seuils de détection des deux nouveaux indicateurs ce qui représente l'originalité de notre travail.

III.1 Formulation du modèle

Un défaut de roulement induit dans la majorité des cas des chocs périodiques. Les forces causant ces chocs vont aussi exciter les résonances du roulement. On peut donc modéliser le signal d'un choc par la réponse de résonance d'une structure. Mathématiquement cette réponse peut être simulée par celle d'un système linéaire dissipatif à un degré de liberté avec amortissement de type visqueux [Pac 97], [Bou 98]. Un tel signal sera défini comme suit :

$$S(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} \sin 2\pi F_L t \quad (1)$$

$$\text{Avec : } \tau = \frac{Q}{\pi F_0}, F_L = F_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} \text{ et } Q < \frac{1}{2} \quad (2)$$

Où τ , F_0 , F_L , Q et A représentent respectivement le temps de relaxation, la fréquence d'oscillations libres, la fréquence de résonance, le facteur de qualité et l'amplitude du signal.

Le temps de relaxation est lié au facteur d'amortissement ξ par la relation :

$$\tau = \frac{1}{\omega_0 \xi}, \text{ avec } \omega_0 = \frac{1}{2Q} \quad (3)$$

La figure (3.1.a) représente un exemple d'une réponse à une fréquence propre égale à 1000 Hz. Les signaux vibratoires engendrés par un défaut de roulement peuvent donc être modélisés par la réponse d'un modèle à un degré de liberté à une série d'impulsions. Le signal réponse du système peut être défini comme étant le produit de convolution entre la réponse de résonance de la structure par un peigne de Dirac de pas T_d . Un tel signal peut s'écrire sous la forme :

$$S'(t) = S(t) * \sum_{k=0}^{\infty} \delta(t - kT_d) \quad (4)$$

La figure (3.1.b) représente le produit de convolution des deux signaux d'auparavant et qui peut modéliser un défaut de roulement dont la fréquence d'apparition est égale à 100 Hz. La transformée de Fourier de ce signal est représentée par la figure (3.2). Les composantes dominantes sont celles correspondant aux fréquences de résonance du roulement (1000 Hz). En plus des bandes latérales, dont l'espacement correspond à la fréquence de choc soit 100 Hz, sont présentes autour de cette même fréquence.

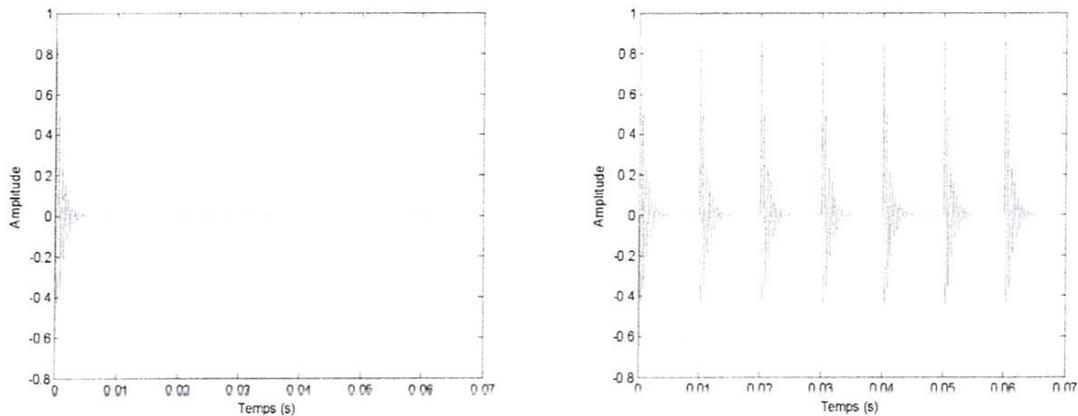


Figure 3.1 : Principe du modèle utilisé : (a) Signal d'une réponse à une fréquence propre égale à 1000 Hz, (b) Signal simulant des chocs à 100 Hz

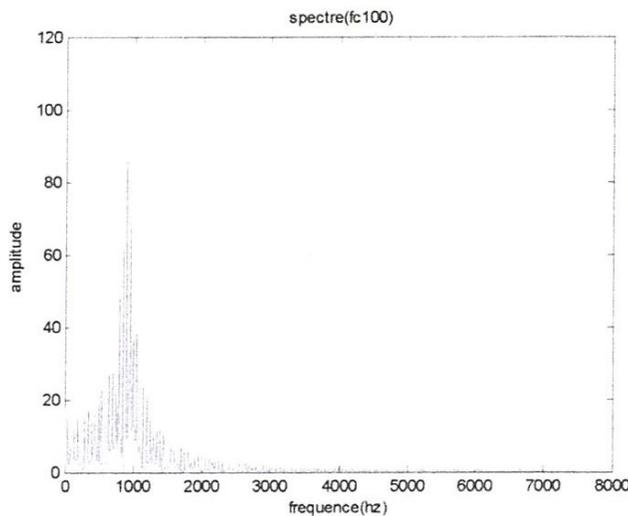
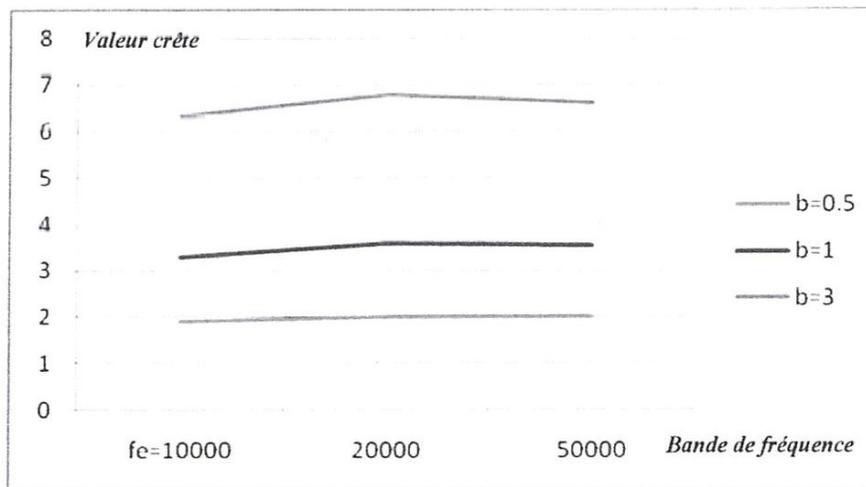


Figure 3.2 : Transformée de Fourier du signal de choc ($F_c=100$ Hz)

III.2 Sensibilité des indicateurs scalaires dans le cas sans défaut

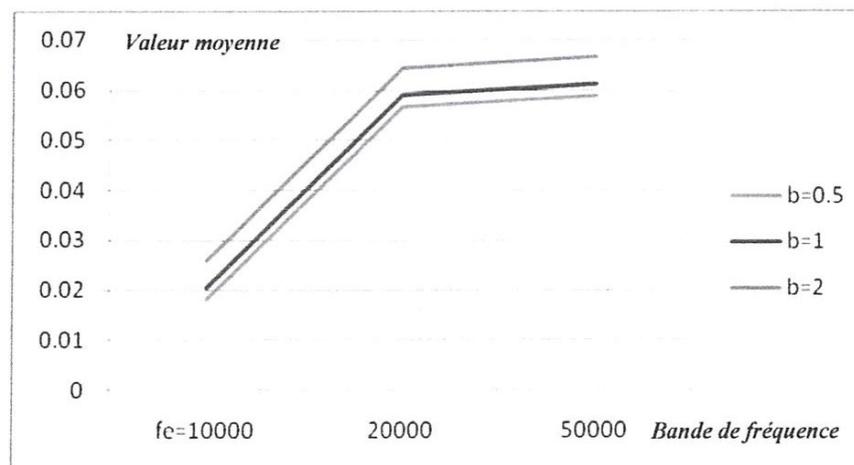
Sept indicateurs scalaires sont considérés dans cette section, trois sont proportionnels à l'énergie du signal (Valeur crête, valeur moyenne et RMS). Deux sont proportionnels à la forme du signal (Kurtosis et facteur de crête) et les deux derniers sont ceux que nous allons étudier pour la première fois : le facteur de forme et le facteur d'impulsion. Dans cette section on considère le cas sans défaut, le signal correspondant est constitué de plusieurs fréquences choisies d'une manière aléatoire ainsi que plusieurs niveaux de bruit blanc Gaussien. Trois niveaux de bruit et trois fréquences d'échantillonnage sont considérés dans cette étude. L'objectif principal est de définir l'apport et les limitations de chaque indicateur ainsi que la détermination des seuils de détection pour le facteur de forme et le facteur d'impulsion. Les figures (3.3) qui suivent montrent les résultats obtenus.

Valeur crête



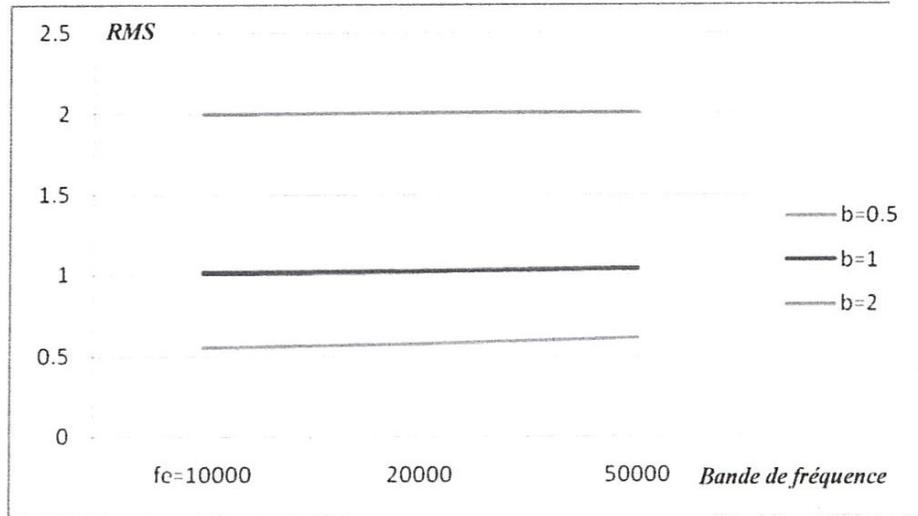
(a)

Valeur moyenne



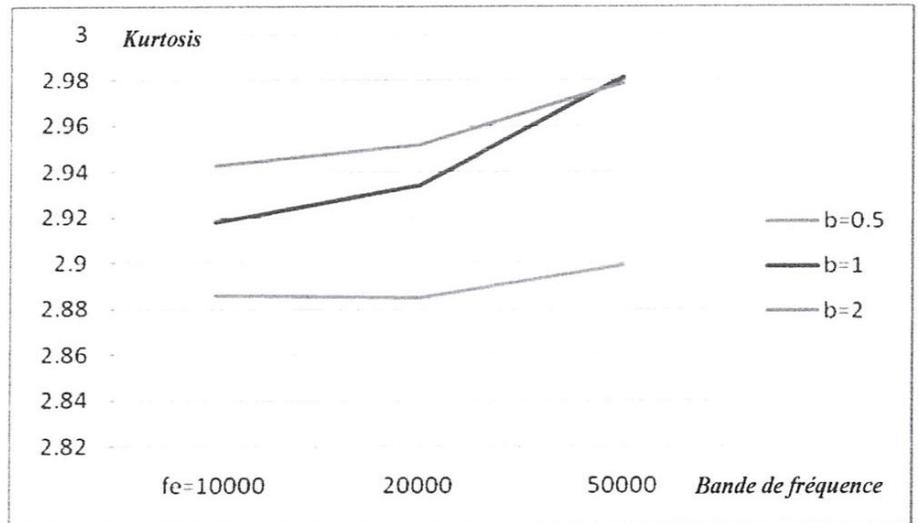
(b)

RMS

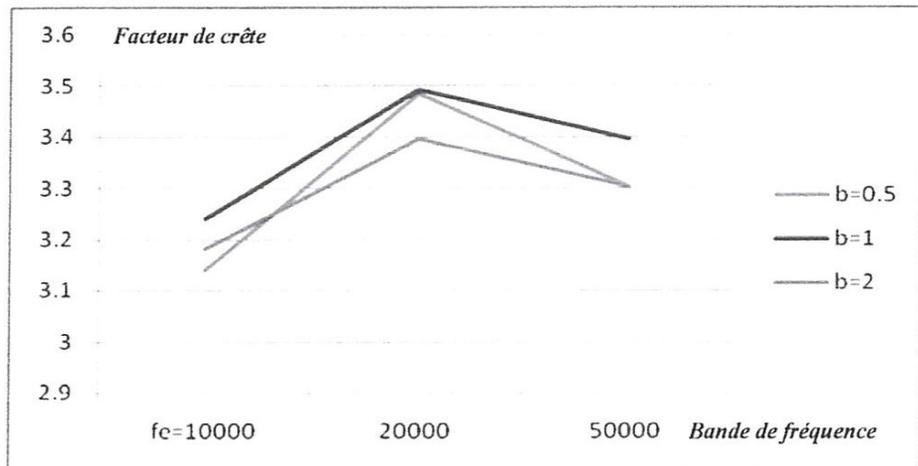


(c)

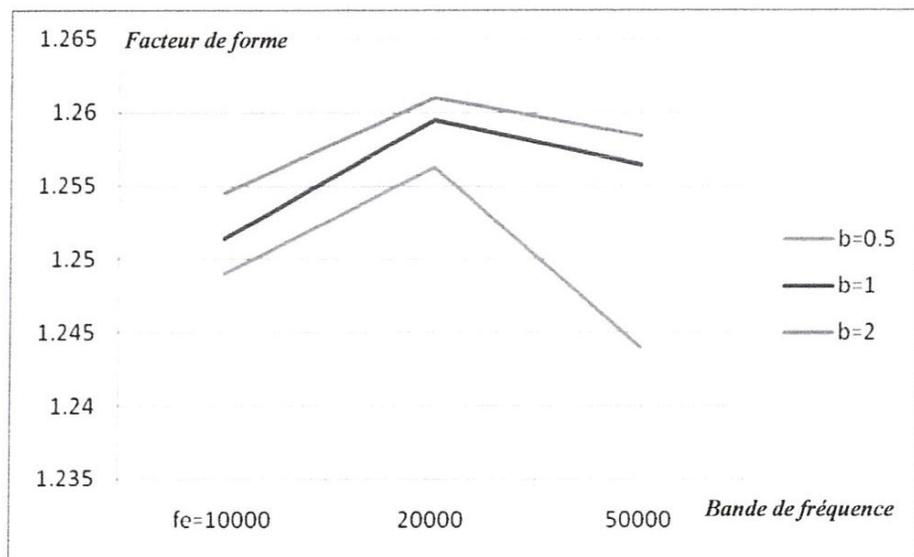
Kurtosis



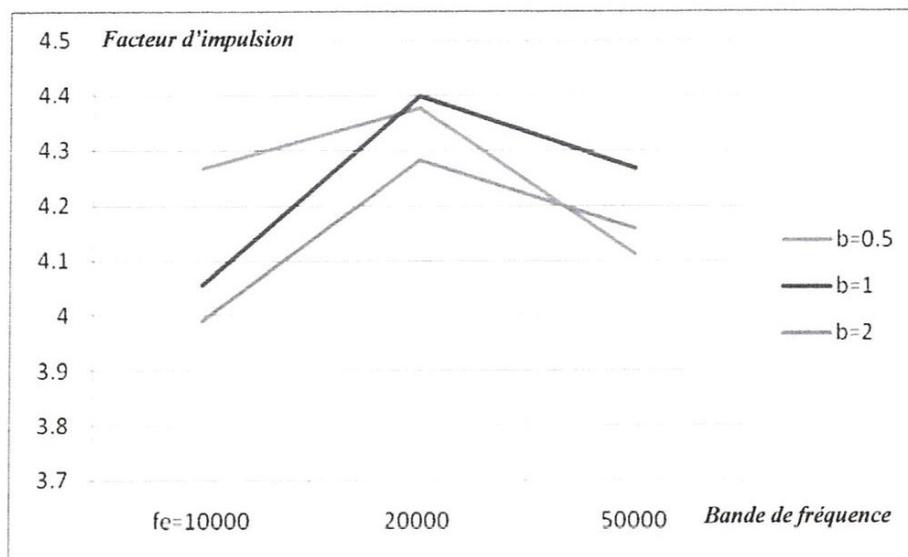
(d)

Facteur de crête

(e)

Facteur de forme

(f)

Facteur d'impulsion

(g)

Figure 3.3 : Indicateurs scalaires dans le cas sans défaut

L'examen des figures précédentes nous conduit à conclure les points suivants :

1. La valeur moyenne, la valeur crête et le RMS n'ont pas des seuils de détection particuliers, ils sont proportionnels à l'énergie du signal et non pas à sa forme, la raison pour laquelle ils augmentent avec l'augmentation du niveau du bruit ;
2. On confirme les seuils de détection du kurtosis et du facteur de crête. Pour les différentes configurations, le kurtosis est compris entre 2,88 et 2,98, donc inférieur à trois. Pour le facteur de crête les valeurs sont comprises entre 3,1 et 3,5, donc inférieures à 6, ce qui concorde avec la littérature ;
3. Pour le facteur de forme les valeurs sont comprises entre 1,24 et 1,26. Le facteur d'impulsion, quant à lui, est compris entre 4 et 4,4.

D'après cette étude on peut conclure que puisque les valeurs du kurtosis et du facteur de crête concordent avec les valeurs normales pour le cas sans défaut, donc le modèle utilisé est acceptable. Les valeurs ainsi obtenues pour le facteur de forme et le facteur d'impulsion peuvent ainsi représenter des seuils de détection. Bien évidemment cette conclusion sera confirmée, voire corrigée, par l'étude expérimentale.

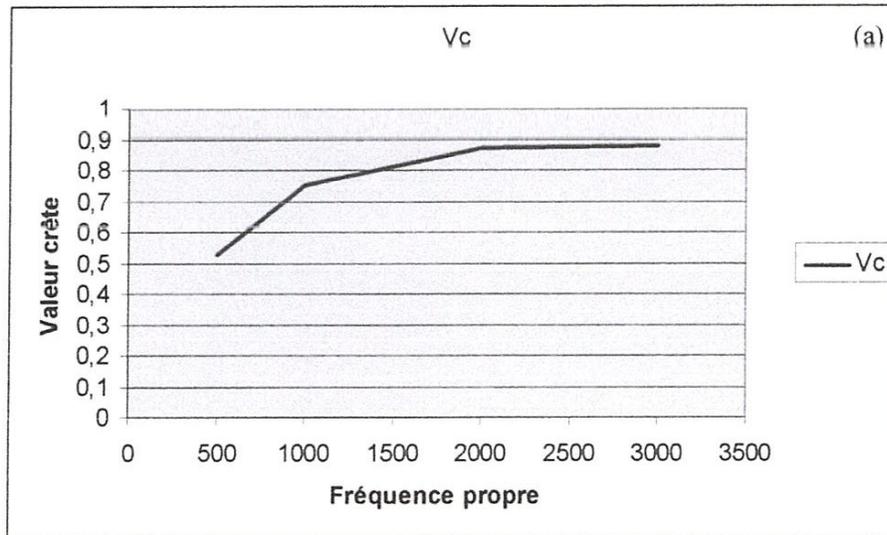
III.3 Influence des différents paramètres sur la sensibilité des indicateurs scalaires dans le cas d'un défaut

Cette section est destinée à l'étude de la sensibilité des indicateurs scalaires dans le cas d'un défaut en fonction de plusieurs paramètres du modèle. L'objectif principal est de déterminer le comportement du facteur de forme et le facteur d'impulsion comparés au kurtosis et du facteur de crête.

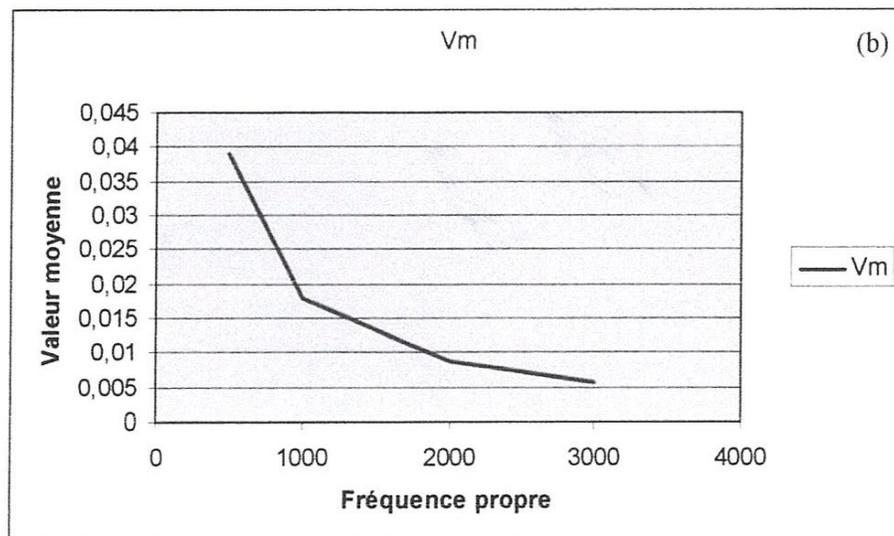
III.3.1 Influence de la fréquence propre

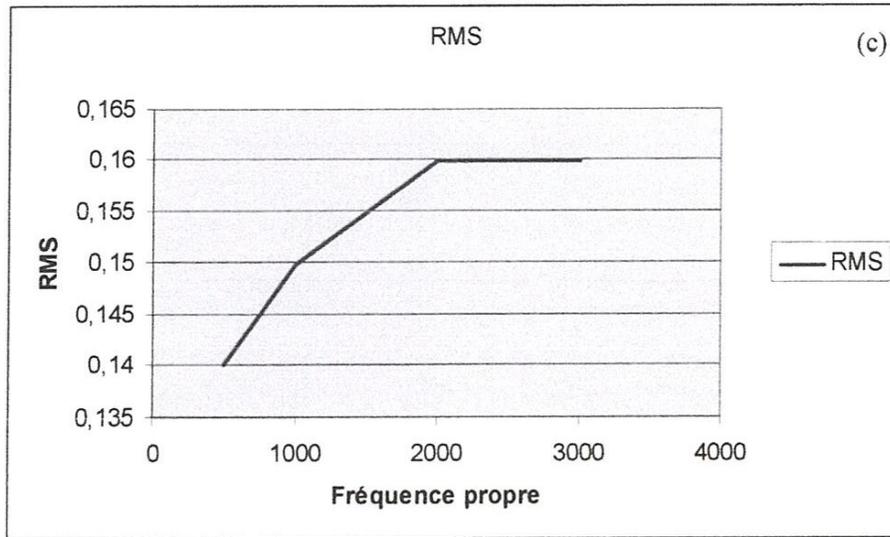
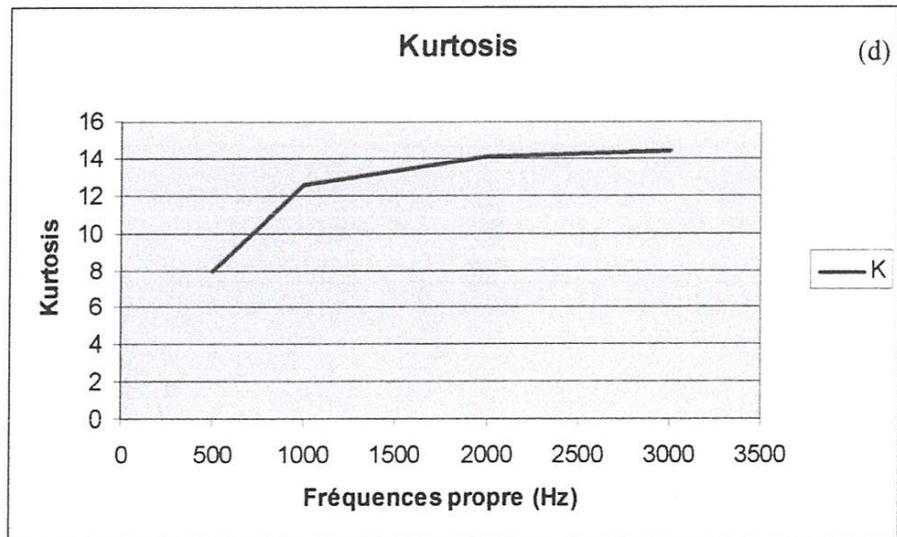
Pour une fréquence d'échantillonnage $F_e = 30000$ Hz, fréquence du choc $F_c = 100$ Hz, nombre de points $N = 2048$ points, un temps de relaxation $\zeta = 0.001$ s, et avec les fréquences propres ($F_p = 500, 1000, 2000, 3000$ Hz) on obtient les résultats suivants (Figure 3.4) :

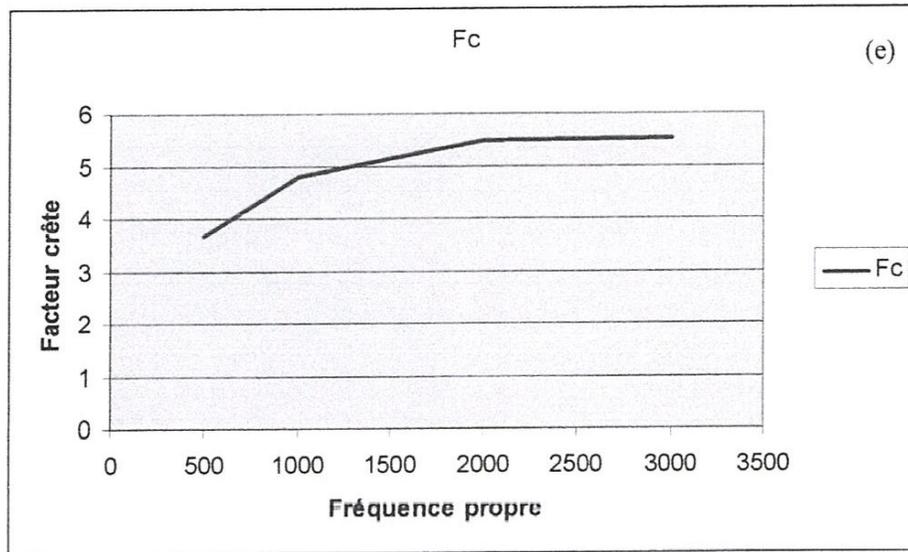
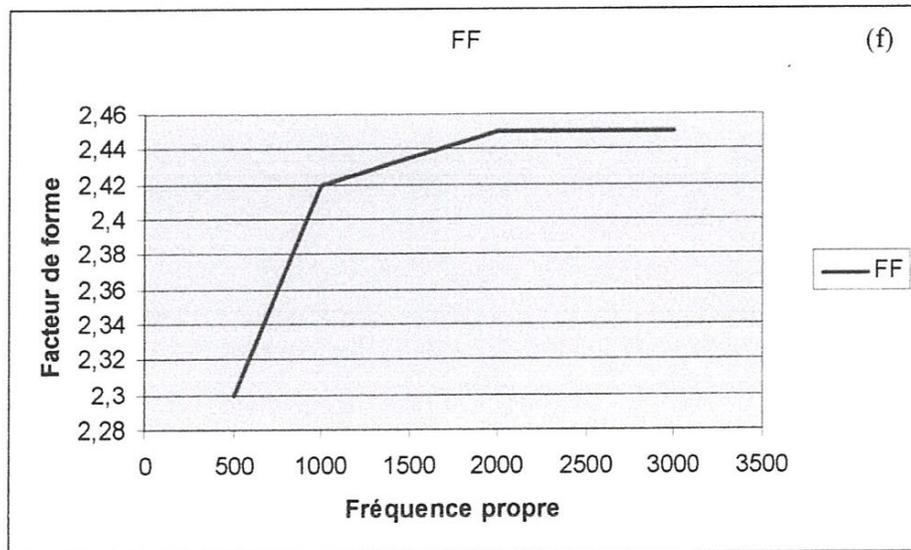
Valeur crête



Valeur moyenne



RMSKurtosis

Facteur crêteFacteur de forme (Shape factor)

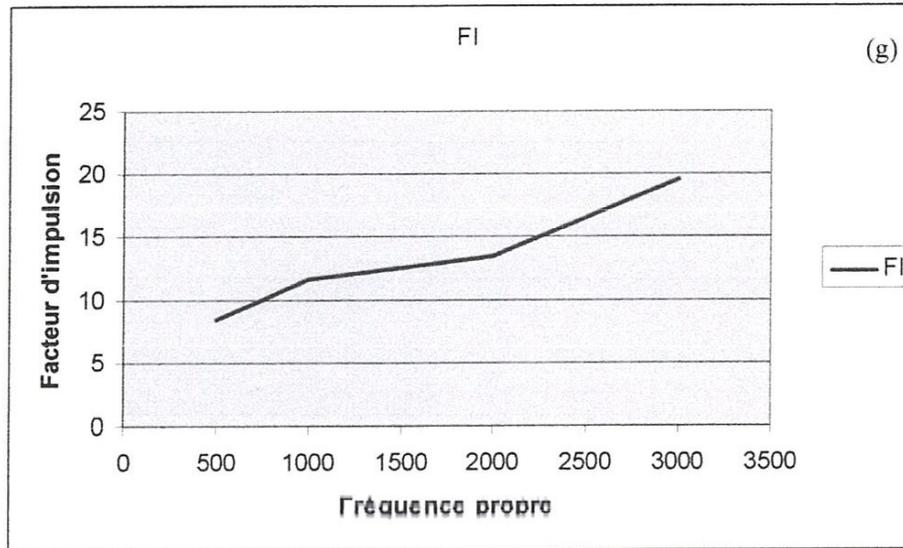
Facteur d'impulsion (impulsion factor)

Figure 3.4 : Indicateurs scalaires en fonction de la fréquence propre du roulement

L'examen des figures (3.4) nous conduit à conclure les points suivants :

1. Pour le RMS et la valeur crête, les valeurs augmentent avec l'augmentation de la fréquence propre du roulement, tandis qu'ils diminuassent pour la valeur moyenne ;
2. Le kurtosis et le facteur de crête augmentent avec l'augmentation de la fréquence propre mais dans des proportions assez faibles ;
3. Le facteur de forme et le facteur d'impulsion augmentent eus aussi et affichent donc une tendance similaire au kurtosis et au facteur de crête.

III.3.2 Influence de la fréquence d'échantillonnage

Pour une fréquence propre $F_p = 3000$ Hz, fréquence du choc $F_c = 100$ Hz, nombre de points $N = 2048$ points, un temps de relaxation $\zeta = 0.001$ s, et avec des fréquences d'échantillonnage ($F_e = 5000, 10000, 30000, 50000$ Hz) on obtient les résultats suivants (Figure 3.5) :

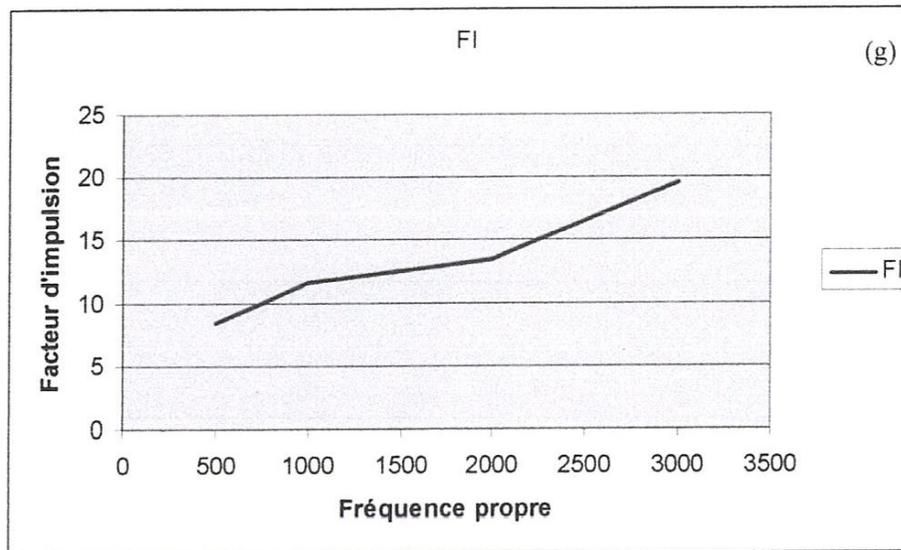
Facteur d'impulsion (impulsion factor)

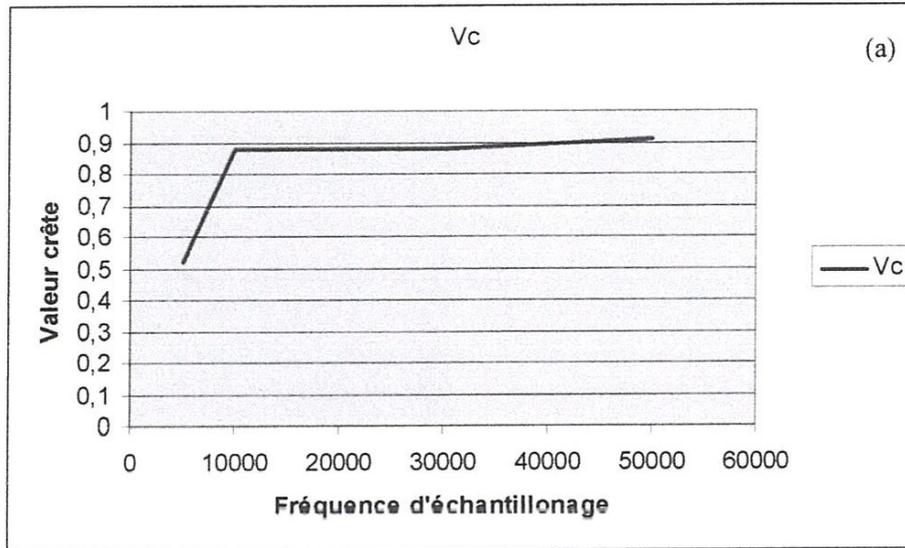
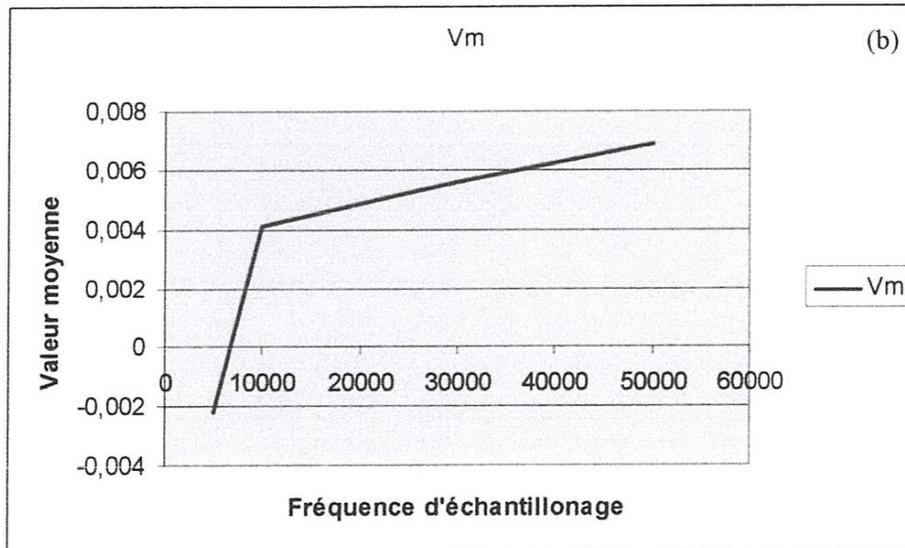
Figure 3.4 : Indicateurs scalaires en fonction de la fréquence propre du roulement

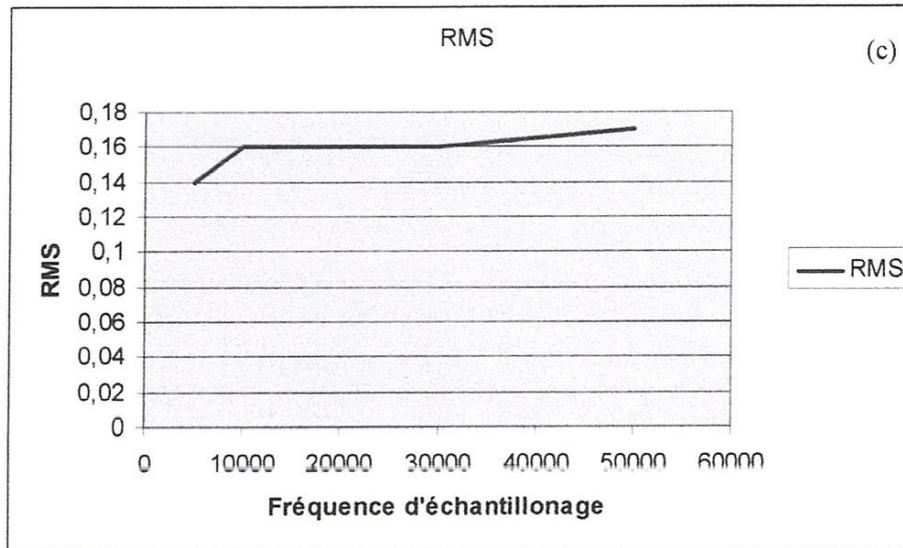
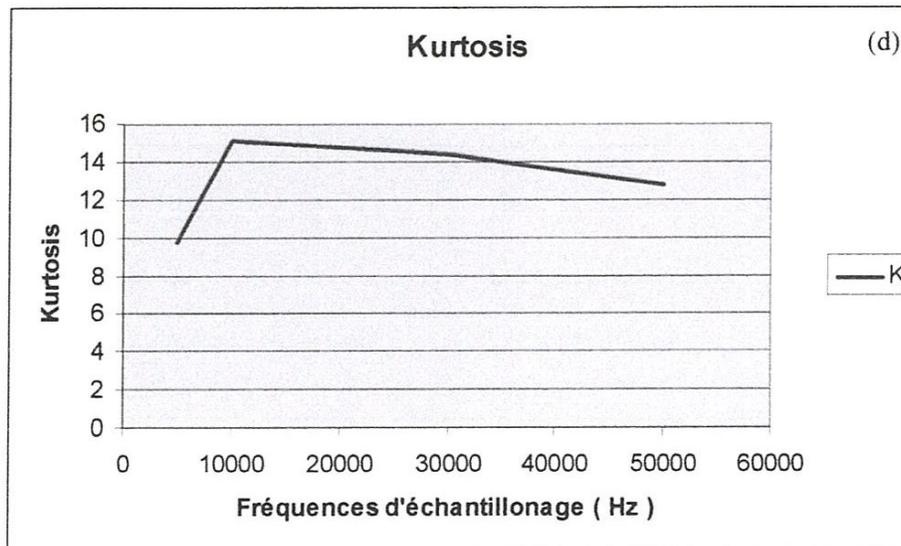
L'examen des figures (3.4) nous conduit à conclure les points suivants :

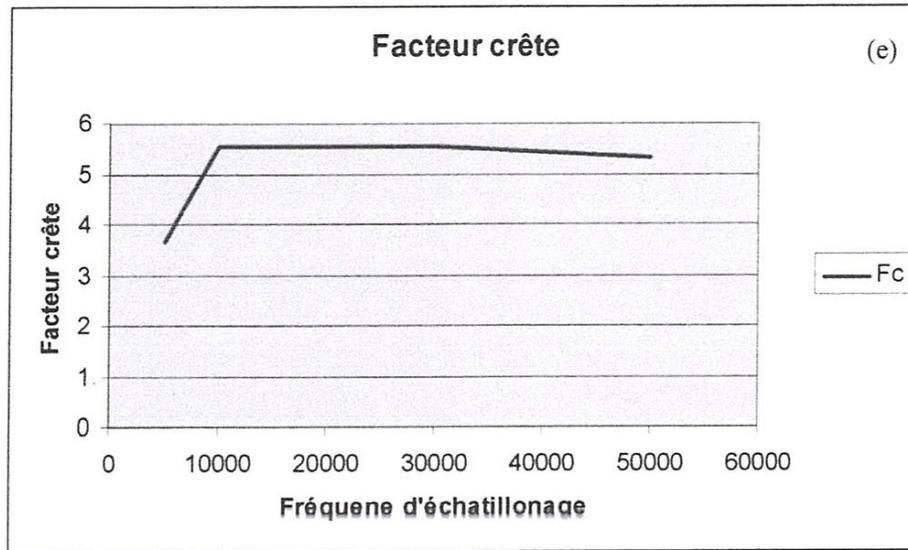
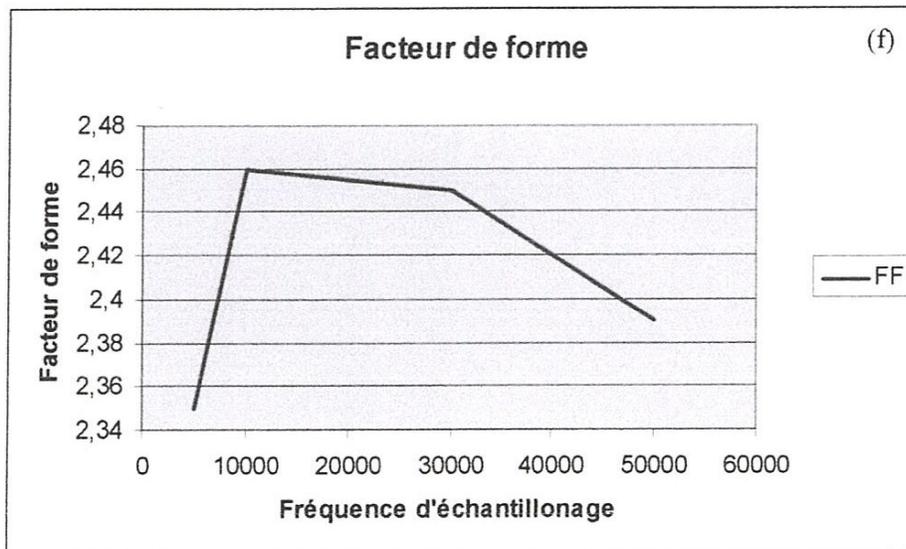
1. Pour le RMS et la valeur crête, les valeurs augmentent avec l'augmentation de la fréquence propre du roulement, tandis qu'ils diminuassent pour la valeur moyenne ;
2. Le kurtosis et le facteur de crête augmentent avec l'augmentation de la fréquence propre mais dans des proportions assez faibles ;
3. Le facteur de forme et le facteur d'impulsion augmentent eux aussi et affichent donc une tendance similaire au kurtosis et au facteur de crête.

III.3.2 Influence de la fréquence d'échantillonnage

Pour une fréquence propre $F_p = 3000$ Hz, fréquence du choc $F_c = 100$ Hz, nombre de points $N = 2048$ points, un temps de relaxation $\zeta = 0.001$ s, et avec des fréquences d'échantillonnage ($F_e = 5000, 10000, 30000, 50000$ Hz) on obtient les résultats suivants (Figure 3.5) :

Valeur crêteValeur moyenne

RMSKurtosis

Facteur crêteFacteur de forme (shape factor)

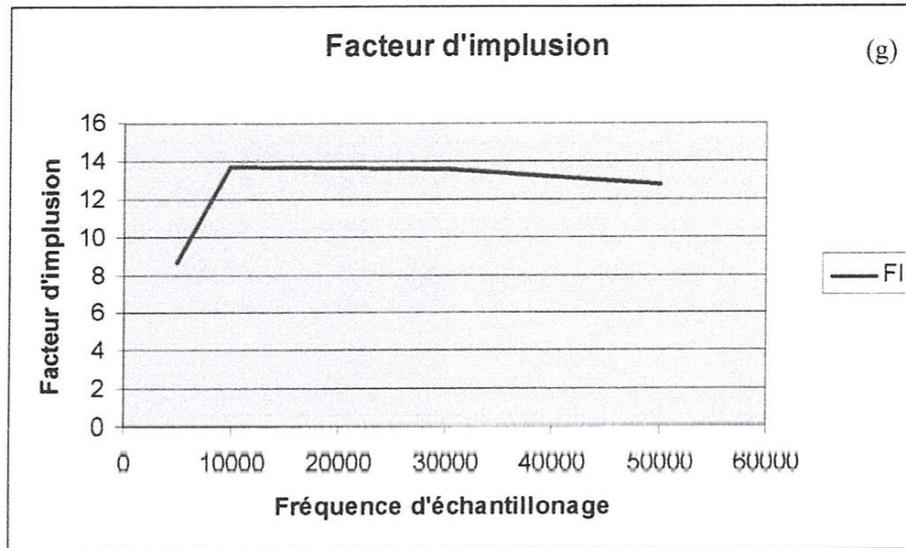
Facteur d'impulsion (impulsion factor)

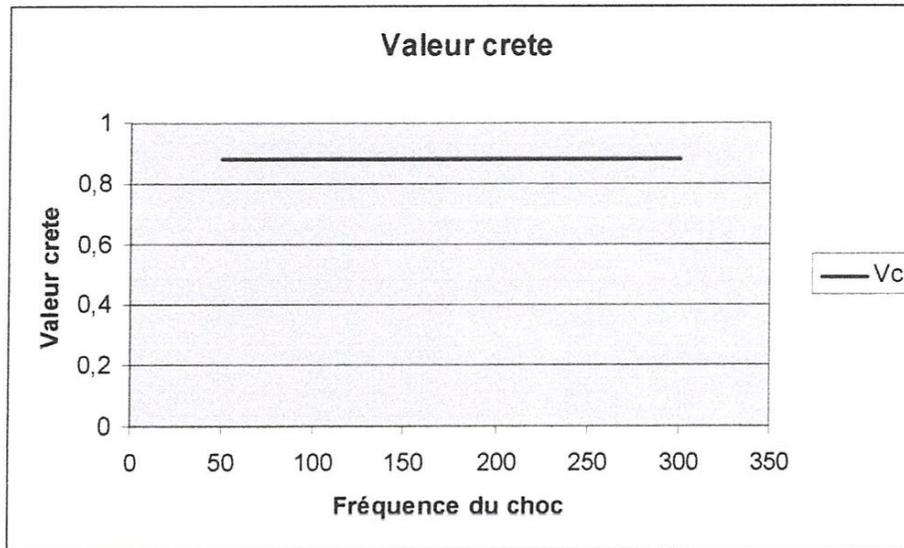
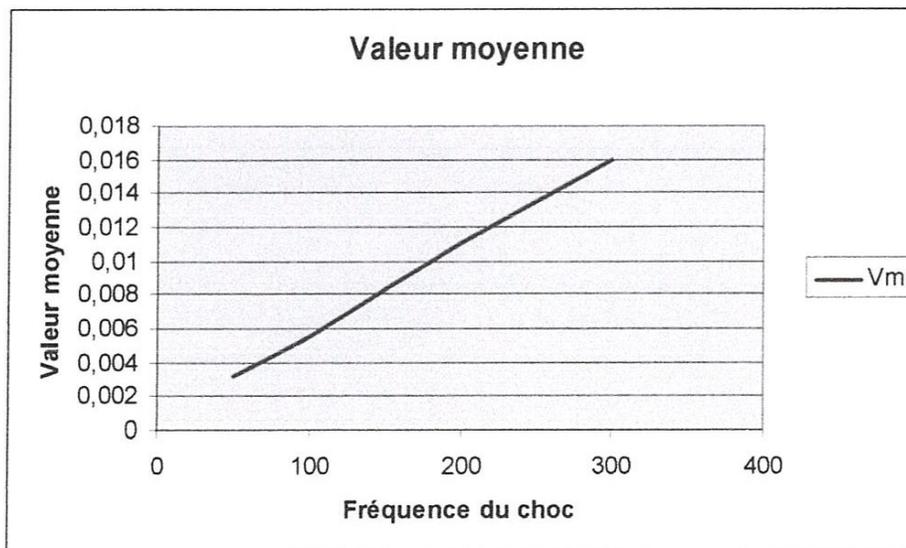
Figure 3.5 : Indicateurs scalaires en fonction de la fréquence d'échantillonnage

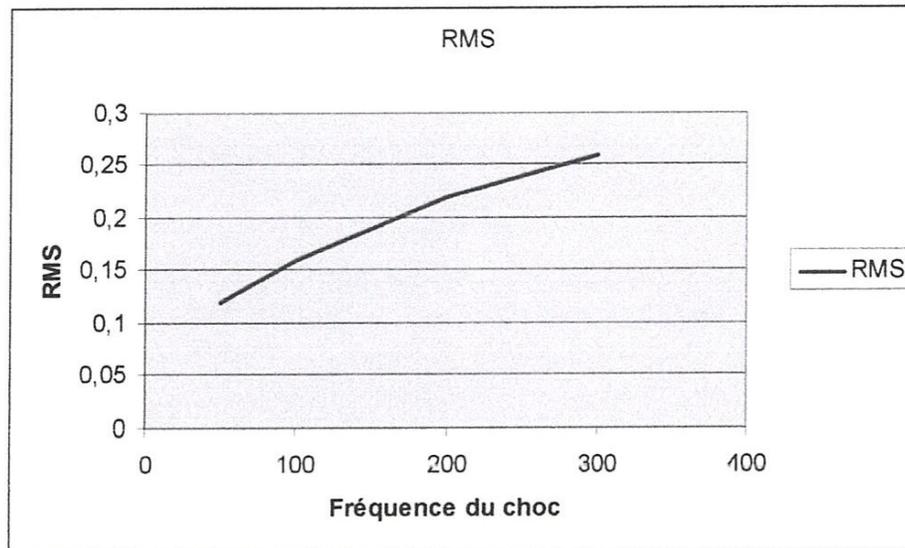
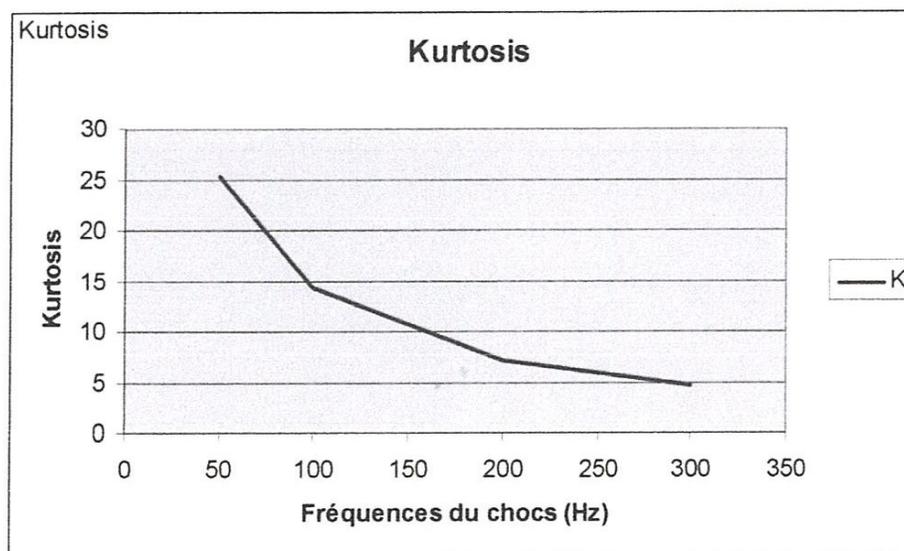
L'examen des figures précédentes nous conduit à conclure les points suivants :

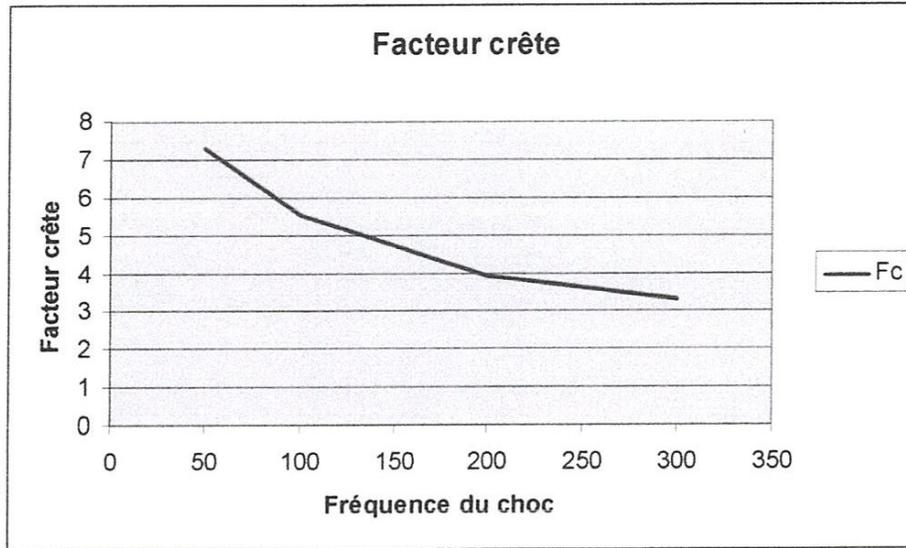
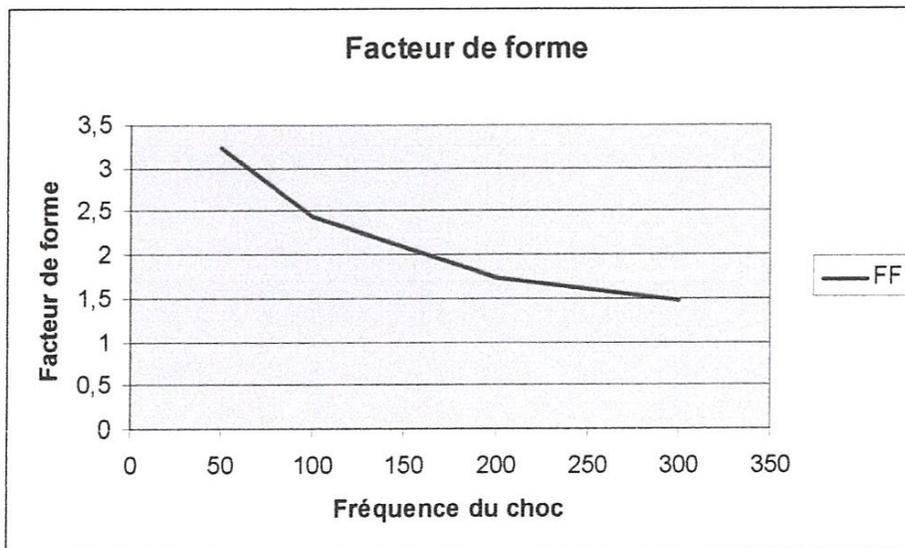
1. La valeur moyenne, la valeur crête et le RMS augmentent avec l'augmentation de la fréquence d'échantillonnage ;
2. Le kurtosis et le facteur de crête augmentent puis diminuent légèrement, voire se stabilisent ;
3. Le facteur de forme et le facteur d'impact affichent une tendance semblable au kurtosis et au facteur de crête.

III.3.3 Influence de la fréquence du choc

Pour une fréquence propre $F_p = 3000$ Hz, fréquence d'échantillonnage $F_e = 30000$ Hz, nombre de points $N = 2048$ points, un temps de relaxation $\zeta = 0.001$ s, et avec des fréquences de choc ($F_c = 50, 100, 200, 300$ Hz) on obtient les résultats suivants (Figures 3.6) :

Valeur crêteValeur moyenne

RMSKurtosis

Facteur crêteFacteur de forme (shape factor)

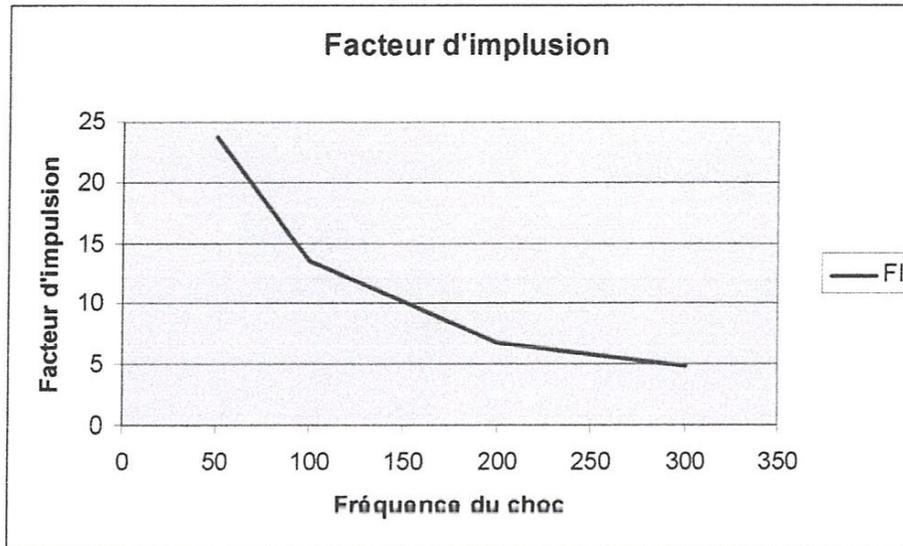
Facteur d'impulsion (impulsion factor)

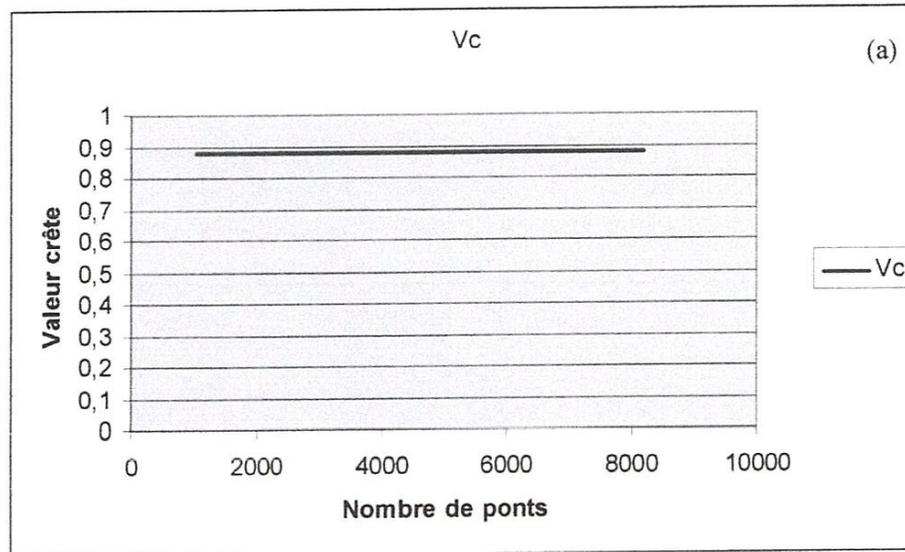
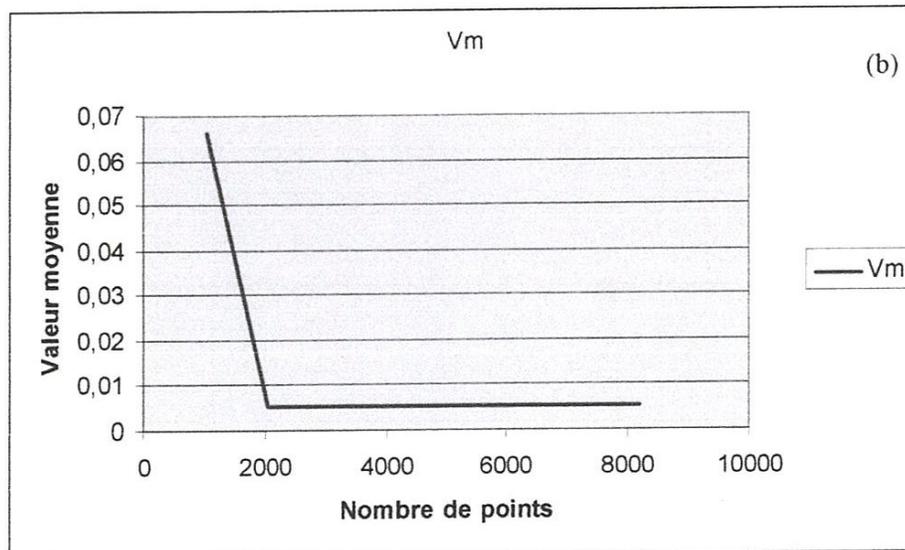
Figure 3.6 : Indicateurs scalaires en fonction de la fréquence de choc

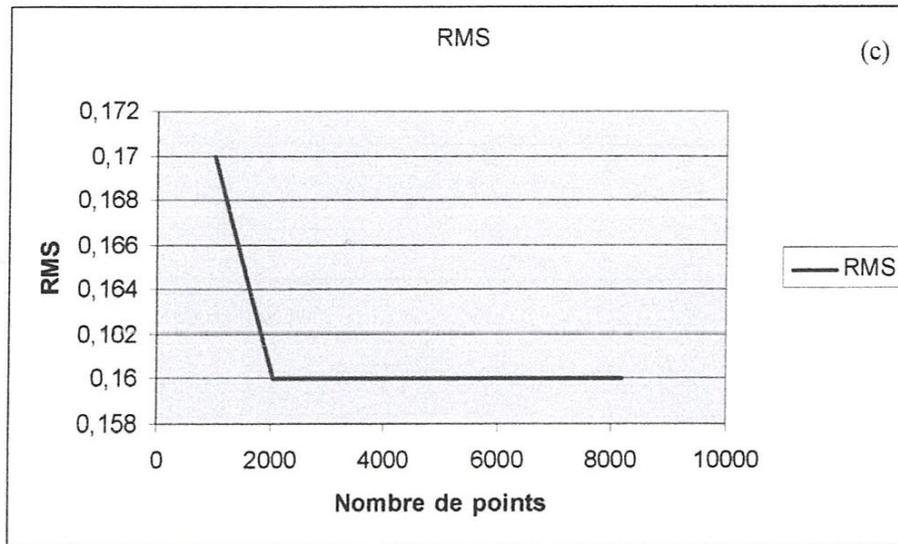
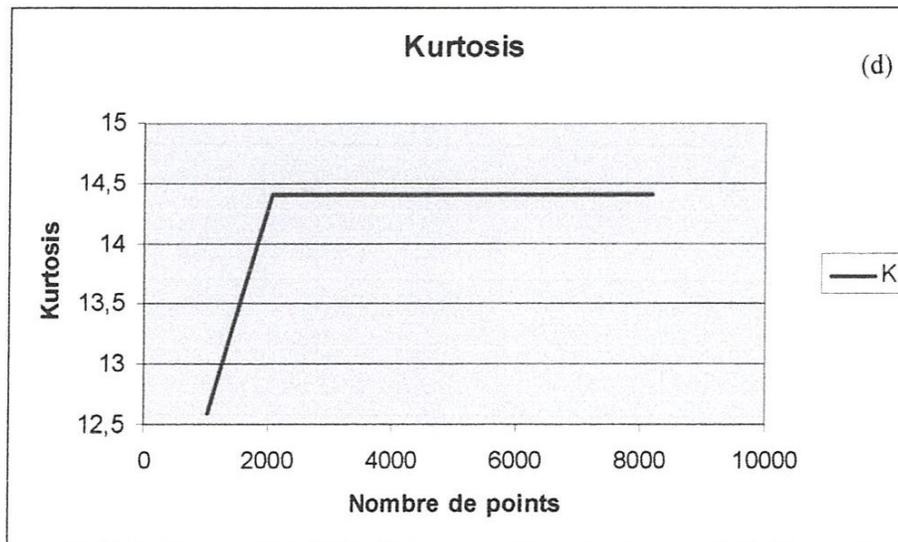
Trois conclusions essentielles sont à signaler à partir de ces figures :

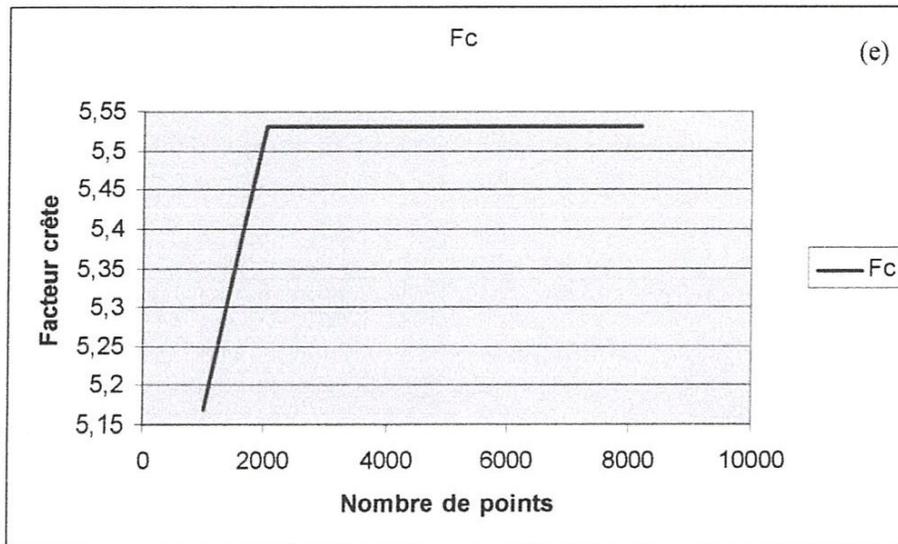
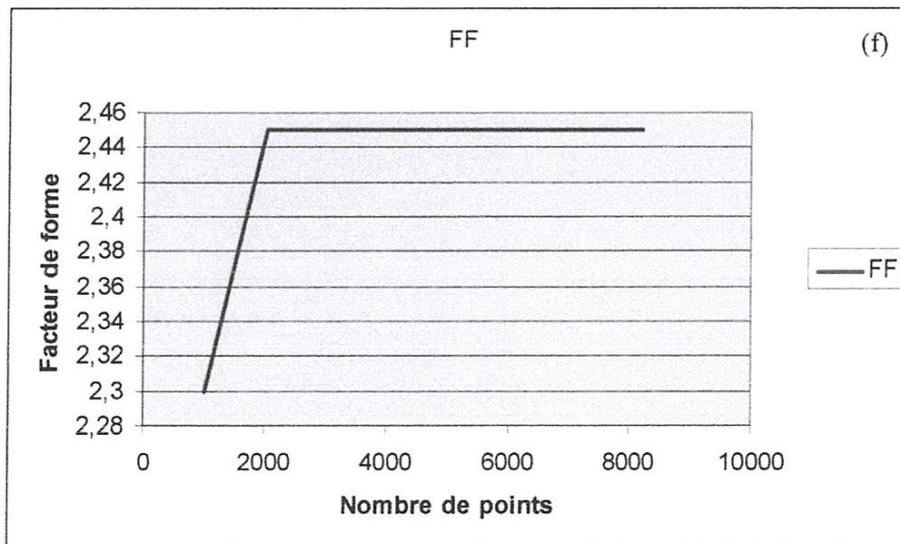
1. La valeur moyenne et le RMS augmentent avec l'augmentation de la fréquence de choc, alors que la valeur crête reste pratiquement instable ;
2. Le kurtosis et le facteur de crête diminuent avec l'augmentation de la fréquence de choc, ce qui concorde parfaitement avec la littérature ;
3. Le facteur de forme et le facteur d'impulsion affichent la même tendance que le kurtosis et le facteur de crête puisqu'ils diminuent avec l'augmentation de la fréquence de choc.

III.3.4 Influence du nombre de points

Pour une fréquence propre $F_p = 3000$ Hz, une fréquence d'échantillonnage $F_e = 30000$ Hz, fréquence du choc $F_c = 100$ Hz, un temps de relaxation $\zeta = 0.001$ s, et avec des nombres de points ($N = 1024, 2048, 4096, 8192$ points) on obtient les résultats suivants (Figures 3.7) :

Valeur crêteValeur moyenne

RMSKurtosis

Facteur crêteFacteur de forme (shape factor)

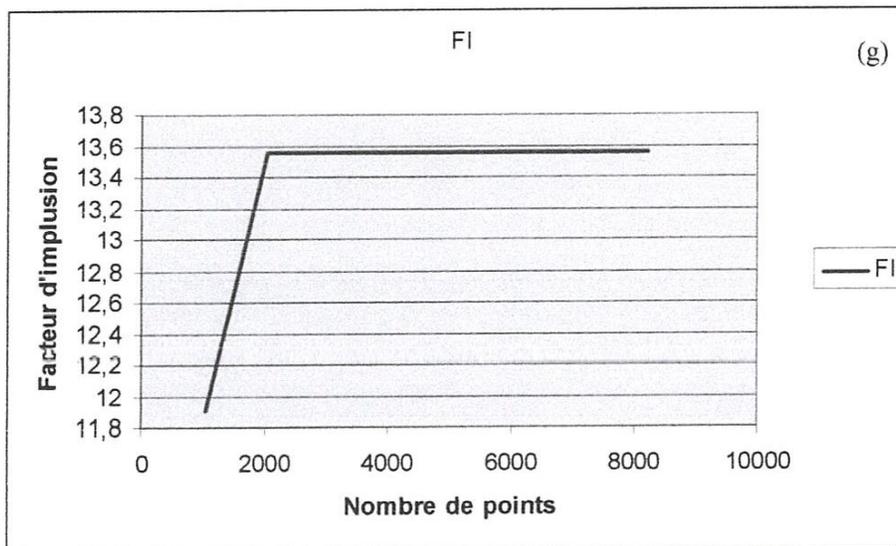
Facteur d'impulsion (impulsion factor)

Figure 3.7 : Indicateurs scalaires en fonction du nombre de point du signal

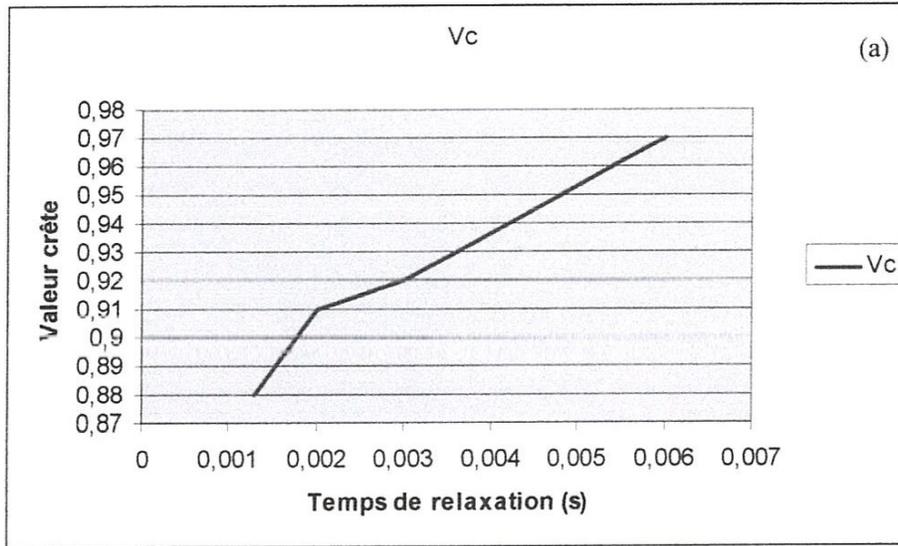
D'après les figures précédentes on peut conclure les points suivants :

1. Le RMS et la valeur moyenne diminuent puis se stabilisent avec l'augmentation du nombre de points, alors que la valeurs crête se montre stable peu importe le nombre de points ;
2. Les quatre indicateurs restants affichent exactement la même tendance puisqu'ils augmentent puis se stabilisent avec l'augmentation du nombre de points.

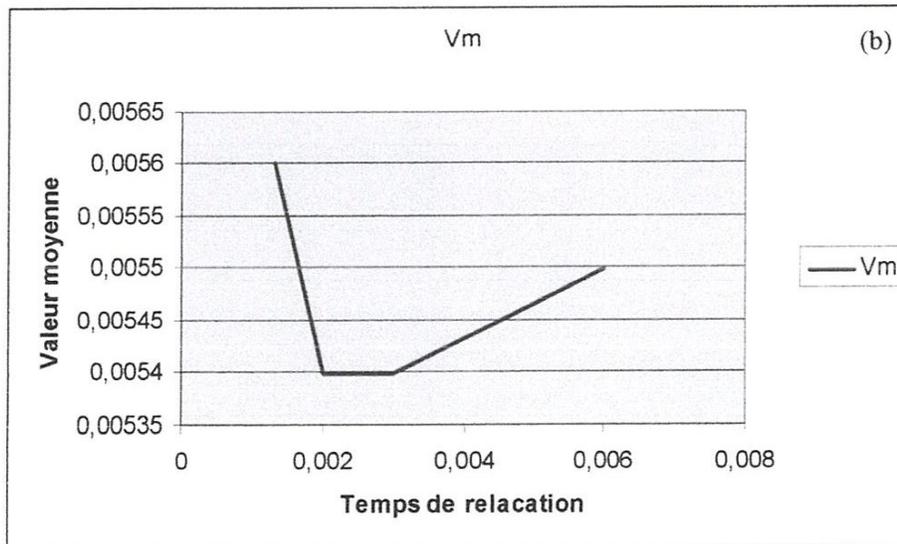
III.3.5 Influence du temps de relaxation

Pour une fréquence propre $F_p = 3000$ Hz une fréquence d'échantillonnage $F_e = 30000$ Hz, fréquence du choc $F_c = 100$ Hz, nombre de points $N = 2048$ points et avec un temps de relaxation ($\zeta = 0.001, 0.002, 0.003, 0.006$ s) on obtient les résultats suivants (Figures 3.8) :

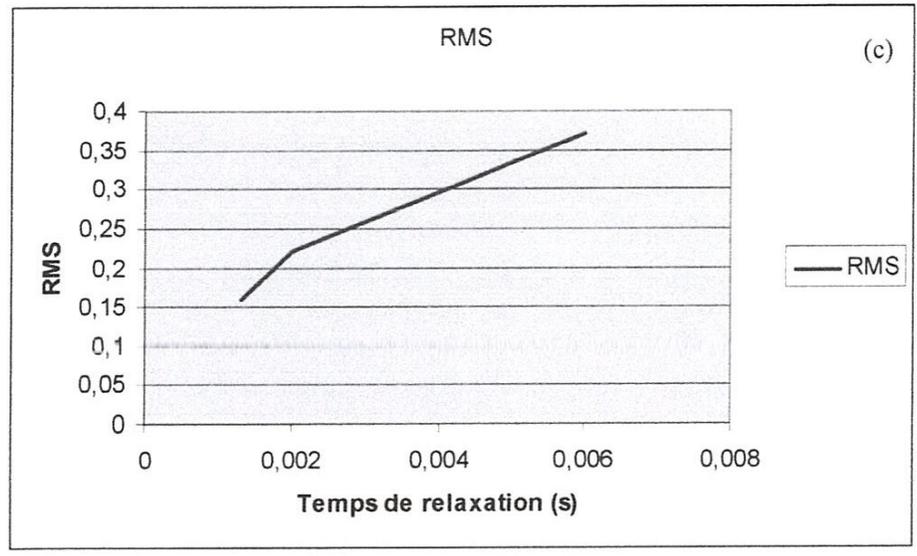
Valeur crête



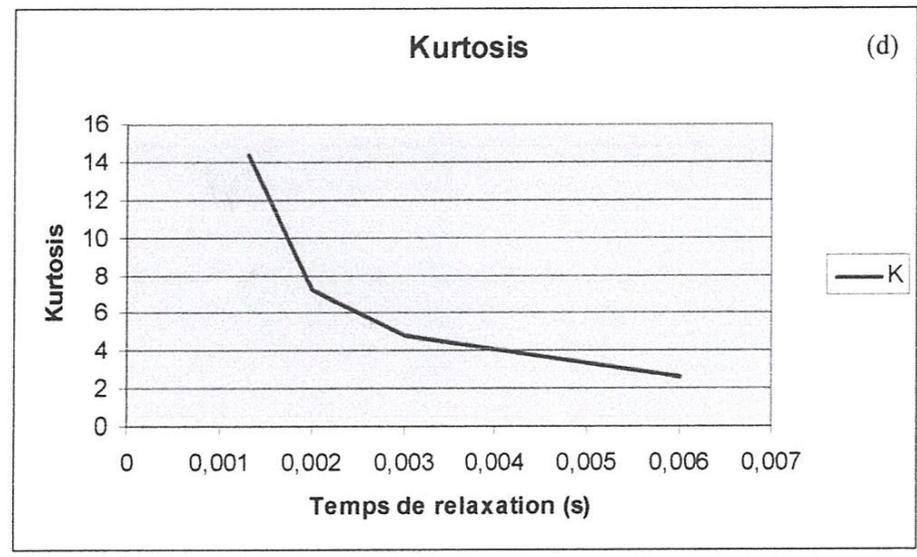
Valeur moyenne



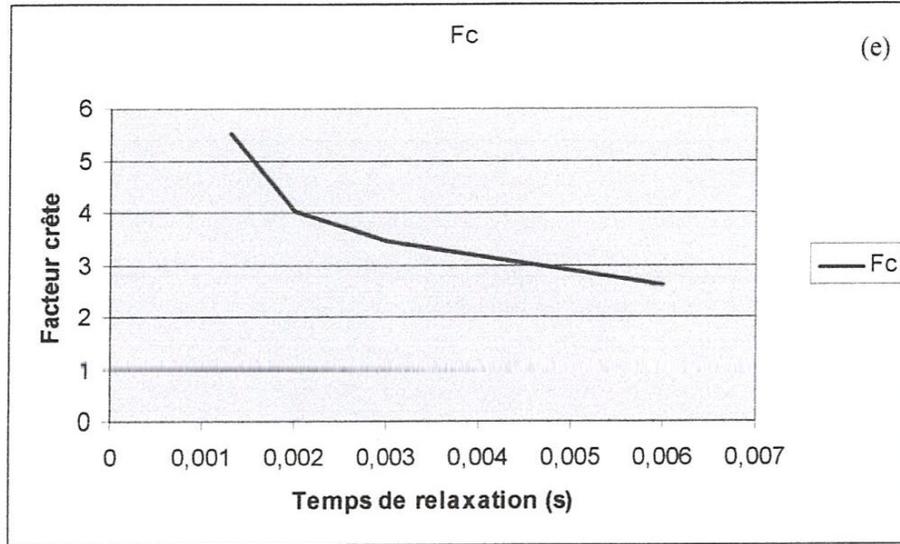
RMS



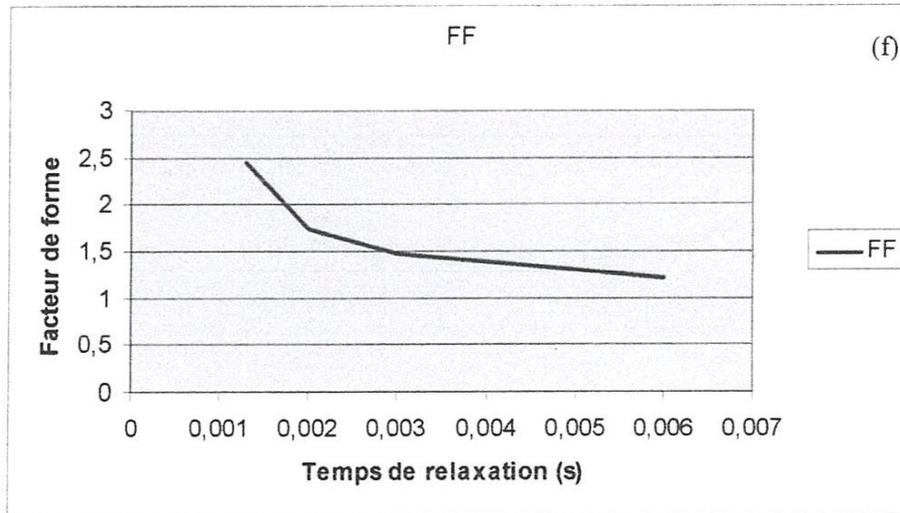
Kurtosis



Facteur crête



Facteur de forme (shape factor)



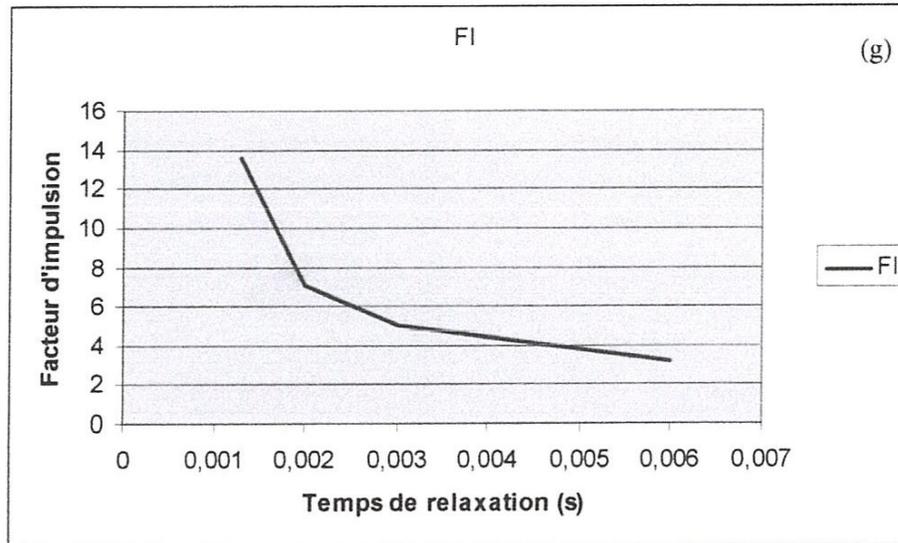
Facteur d'impulsion (impulsion factor)

Figure 3.7 : Indicateurs scalaires en fonction du temps de relaxation

Notons que le temps de relaxation est le temps nécessaire à un choc pour s'amortir, donc il dépend de la gravité du défaut. Les figures précédentes nous conduisent à conclure les points suivants :

1. Le RMS et la valeur crête augmentent avec l'augmentation du temps de relaxation, alors que la valeur moyenne n'a pas une tendance particulière ;
2. Le kurtosis et le facteur de crête diminuent avec l'augmentation du temps de relaxation ce qui concorde parfaitement avec la littérature ;
3. Le facteur de forme et le facteur d'impulsion suivent la même tendance que le kurtosis et le facteur de crête puisqu'ils diminuent avec l'augmentation du temps de relaxation.

III. 4 Conclusion du chapitre

Ce chapitre était destiné à l'étude de la sensibilité des indicateurs scalaires dans le cas sans et avec défaut. Sept indicateurs ont été utilisés, cinq sont bien connus dans la littérature et les deux autres sont de nouveaux indicateurs dont nous n'avons pas trouvé une étude détaillée dans les références que nous avons pu trouver.

Après la présentation de la formulation mathématique du modèle utilisé, nous avons procédé à l'étude de ces indicateurs pour le cas sans défaut. Les résultats obtenus nous ont permis de confirmer les seuils de détection des indicateurs connus et la détermination des seuils de détection du facteur de forme et du facteur d'impulsion. Désormais le facteur de forme pour un signal normal sans défaut est compris entre 1,24 et 1,26 tandis que le facteur d'impulsion est compris entre 4 et 4,4.

L'étude de la sensibilité des indicateurs scalaires dans le cas avec défaut nous a permis de confirmer que le facteur de forme et le facteur d'impulsion ont des tendances parfaitement identiques à celles du kurtosis et du facteur de crête ce qui nous conduit à conclure qu'ils sont donc proportionnels à la forme du signal et non pas à son énergie comme le RMS, la valeur crête ou la valeur moyenne. Ils peuvent donc être des indicateurs de détection fiables des défauts de roulements.

Chapitre IV

Validation expérimentale



Chapitre IV

Validation expérimentale

But du chapitre

Ce chapitre comporte deux parties essentielles : la première partie est consacrée à la présentation de la démarche expérimentale suivie pour la réalisation de nos mesures. La deuxième partie concerne la présentation des différents résultats expérimentaux issus du traitement des différents signaux mesurés dans plusieurs configurations.

IV.1 Démarche expérimentale

IV.1.1 Compagne de mesures

La compagne de mesures a été réalisée au Laboratoire de Mécanique & Structures de l'Université de Guelma. L'idée de cette compagne est de noyer volontairement le signal du défaut des roulements testés dans les autres composantes fréquentielles issues des éléments de tour sur lequel est monté le banc d'essais. Dans ce cas, nous serons plus proches des conditions réelles d'exploitation du roulement du fait que la signature vibratoire du défaut sera moins évidente à extraire. Les détails du montage expérimental seront présentés plus loin dans le chapitre.

IV.1.2 Caractéristiques des roulements

Les roulements utilisés sont des roulements à billes à contact radial de type 6205 dont les caractéristiques géométriques sont mentionnées dans le tableau 4.1.

Diamètre intérieur (mm)	25
Diamètre extérieur (mm)	52
Diamètre de la bille (mm)	7.94
Nombre de billes	9

Tableau 4.1 : Caractéristiques géométriques des roulements utilisés

IV.1.3 Technique de création des défauts

Afin de cerner la majorité des défauts de roulements qui induisent des chocs, différentes gravités ont été réalisées sur la bague extérieure ou intérieure des quatre roulements (Tableau 4.2).

N° du roulement	Type du défaut	Gravité
1	Sans défaut	-
2	Sur la bague extérieure	Petite
3	Sur la bague intérieure	Petite
4	Sur la bague extérieure	Grande
5	Sur la bague intérieure	Grande

Tableau 4.2 : Types et gravités des défauts simulés

Les défauts ont été provoqués sur la largeur du roulement par des outils en diamant tournant à très grande vitesse pouvant atteindre 50000 tr/min. L'épaisseur très faible de certains outils permet d'accéder aux pistes extérieures et intérieures sans abîmer la cage. La figure 4.1 montre une photo du matériel utilisé pour la création des défauts.

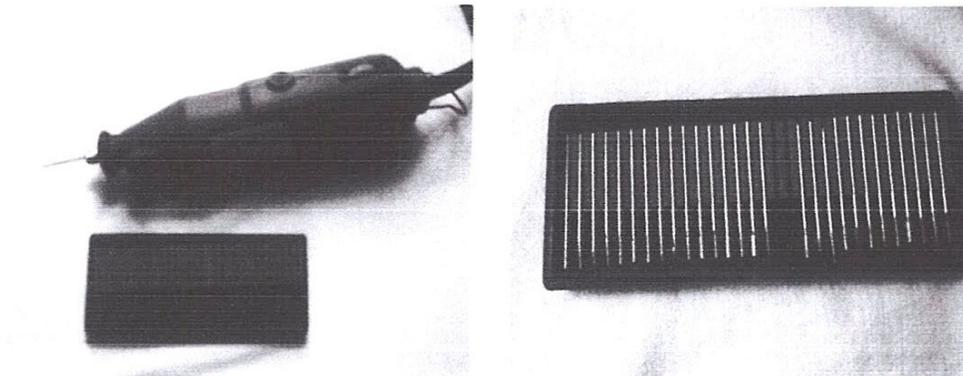


Figure 4.1 : Matériel utilisé pour la création des défauts

La figure 4.2 montre les photos de quelques défauts créés sur la bague intérieure et extérieure des roulements.

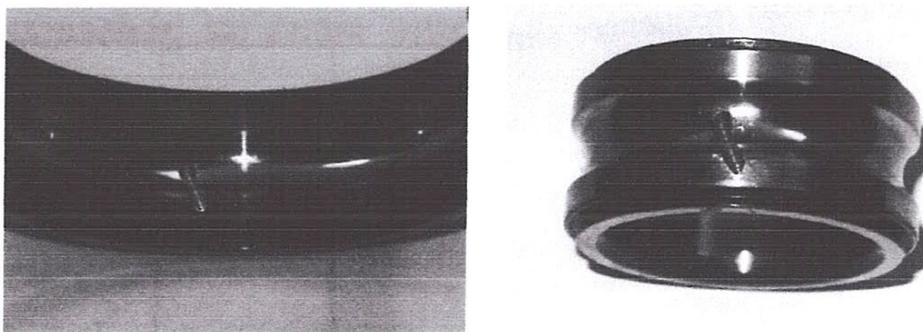


Figure 4.2 : Photos de quelques défauts simulés sur la bague intérieure et extérieure

IV.1.4 Banc d'essais et matériel de mesure

Le banc d'essais en question est d'une conception très simple permettant le montage et le démontage rapide des roulements testés (Figures 4.3 et 4.4). Les roulements sont montés sur un arbre étagé, fixé à la broche du tour qui peut tourner à plusieurs vitesses de rotation disponibles dans la boîte de vitesses. La bague extérieure est fixée par une lunette à trois touches rendant sa rotation quasi impossible. Les mesures d'accélération ont été collectées sur le roulement endommagé par un accéléromètre monté sur la bague extérieure en se servant d'un analyseur B&K 2035 (Figure 4.5).

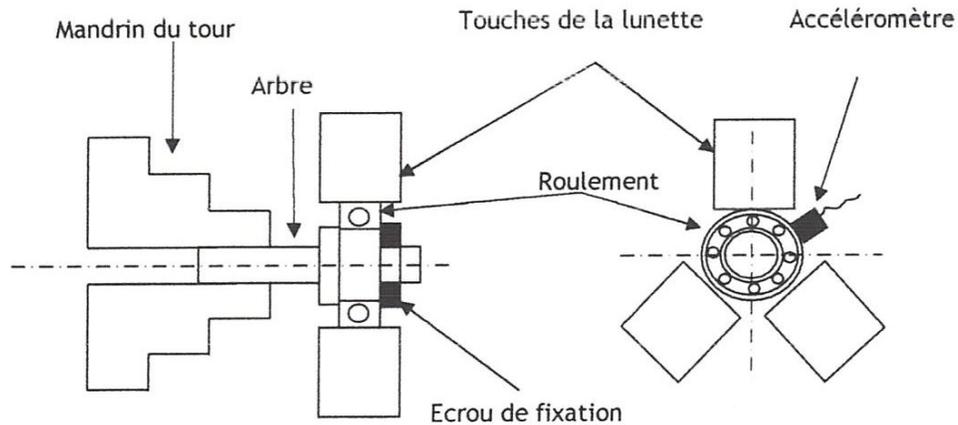


Figure 4.3 : Schéma du montage conçu

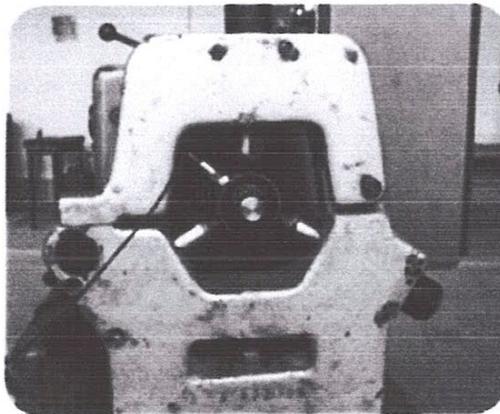


Figure 4.4 : Photo du banc d'essai

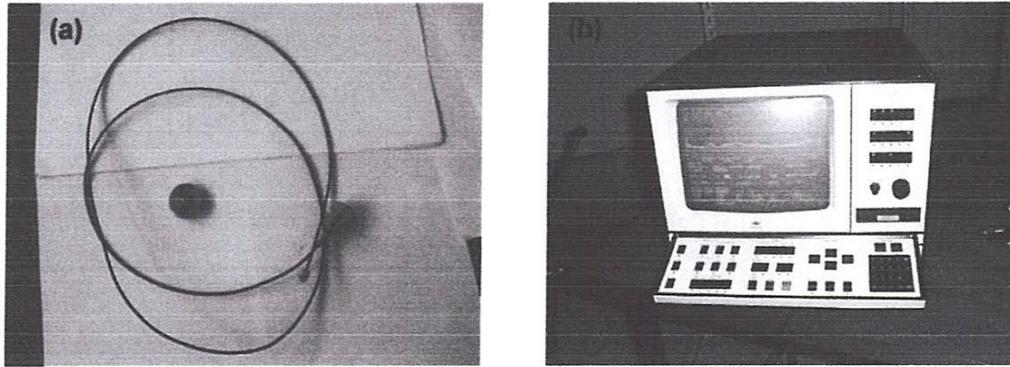


Figure 4.5. Matériel d'acquisition et de mesure : (a) Accéléromètre, (b) Analyseur des vibrations B&K 2035

IV.1.5 Plan d'expériences

Le tableau 4.3 regroupe les facteurs étudiés ainsi que les fréquences caractéristiques d'un défaut sur la bague extérieure (BPFO) et sur la bague intérieure (BPFI) calculées pour les trois vitesses de rotation considérées. Il en résulte un nombre d'essai égal à 75 pour quatre combinaisons de défauts plus le cas sans défaut, trois vitesses de rotation et cinq fréquences d'échantillonnage.

	Roulement N°				
	1	2	3	4	5
Type du défaut	SD	P. Ext.	P. Int.	G. Ext.	G. Int.
Vitesses de rotation [tr/min]	500, 710 et 1400				
Vitesses de rotation [Hz]	8.33, 11.83 et 23.33				
Fréquences d'échantillonnage [Hz]	65536, 32768, 16384, 4096 et 1024				
BPFO [Hz]	29.88, 42.42 et 83.98				
BPFI [Hz]	45.12, 64.08 et 125.98				

Tableau 4.3 : Facteurs étudiés pendant la campagne de mesure

IV.2 Résultats expérimentaux

Le but de cette partie est d'analyser la sensibilité des différents indicateurs scalaires pour localiser les défauts pendant la manifestation et la progression dans les roulements. En premier lieu nous présenterons les résultats obtenus pour le cas sans défaut, ces résultats permettront de fixer les seuils de détection. En deuxième lieu une comparaison de la tendance de quatre indicateurs en fonction de plusieurs paramètres sera entamée.

IV.2.1 Cas sans défaut

Dans ce cas aucun défaut n'a été provoqué sur le roulement, il s'agit donc d'un roulement sain. Le tableau 4.4 montre les valeurs des sept indicateurs scalaires pour différentes configurations.

Vitesse Tr/min	Fe	Vc	Vm	RMS	Kurtosis	Facteur de crête	Facteur de Forme	Facteur d'impulsion
355	1024	0,825	-1,67E-04	0,281	2,4764	2,936	1,2135	3,5628
355	4096	2,53	0,0021	0,5208	3,3352	4,8576	1,2479	6,0617
355	16284	2,38	0,003	0,666	2,9529	3,5738	1,252	4,4744
355	32768	1,23	0,0019	0,3551	2,6995	3,4637	1,2243	4,2405
355	65536	2,73	-0,0019	0,6506	2,8283	4,1961	1,2326	5,1723
710	1024	3,25	-0,0044	1,0314	2,9339	3,1512	1,2589	3,967
710	4096	1,3	0,0038	0,3756	2,7429	3,4613	1,2335	4,2696
710	16284	2,7	0,0097	0,7176	2,962	3,7626	1,248	4,6958
710	32768	5,93	-0,005	1,4318	3,208	4,1416	1,2572	5,2066
710	65536	1,36	0,0035	0,4125	2,7773	3,2973	1,2336	4,0675
1400	1024	2,47	9,57E-04	0,7411	2,8606	3,3327	1,2474	4,1571
1400	4096	5,2	-0,0428	1,3924	3,116	3,7346	1,2595	4,7038
1400	16284	1,19	-0,0022	0,3836	2,6529	3,1025	1,2176	3,7776
1400	32768	2,01	0,0137	0,6547	3,0504	3,0699	1,2712	3,9024
1400	65536	5,65	0,0041	1,3646	3,2793	4,1403	1,2562	5,2009

Tableau 4.4 : Résultats obtenus dans le cas sans défaut

Les résultats illustrés par le tableau (4.4) confirment les seuils de détection du kurtosis et du facteur de crête. Les valeurs sont aux alentours de trois pour le kurtosis et ne dépassent pas cinq pour le facteur de crête (rappelons que la valeur maximale du facteur de crête est égale à six). Ces valeurs concordent parfaitement avec ceux de la littérature. Pour le Facteur de forme, les valeurs ne dépassent pas 1,27 ce qui représente un maximum à atteindre pour le cas sans défaut. Rappelons que la valeur maximale pour le même cas était de 1,26 pour la simulation numérique ce qui représente un excellent résultat. Enfin pour le facteur d'impulsion, la valeur maximale enregistrée est égale à 6. Pour la simulation cette même valeur était égale à 4,4 ce qui constitue une correction de cette valeur obtenu par un modèle mathématique par celle obtenue expérimentalement, qui est la plus réelle. Désormais le

facteur de forme d'un signal sans défaut ne doit pas dépasser 1,27 alors que le facteur d'impulsion du même signal doit rester aux alentours de six.

IV.2.2 Cas d'un défaut

Dans cette partie on considère le cas avec défaut, sur bague extérieure ou intérieure. La comparaison est faite entre le kurtosis et le facteur de crête d'un coté et le facteur de forme et le facteur d'impulsion d'un autre coté. Bien évidemment les tendances des indicateurs sensibles à l'énergie du signal, à l'image du RMS, la valeur crête ou la valeur moyenne ne nous intéressent pas, celles-ci ont fait l'objet de plusieurs études.

Notations

SD : Sans Défaut

PE : Petit Défaut

GD : Grand Défaut

PDI : Petit Défaut sur la bague Intérieure

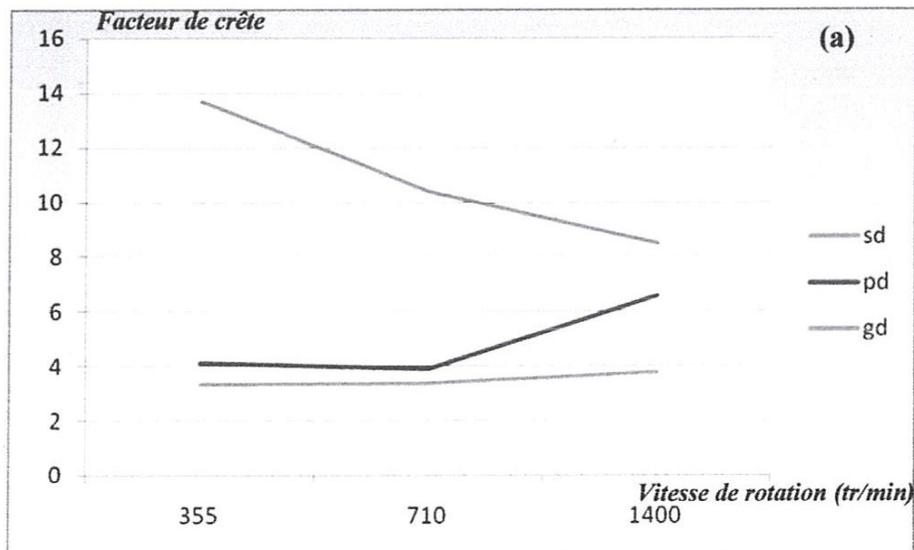
GDI : Grand Défaut sur la bague Intérieure

PDE : Petit Défaut sur la bague Extérieure

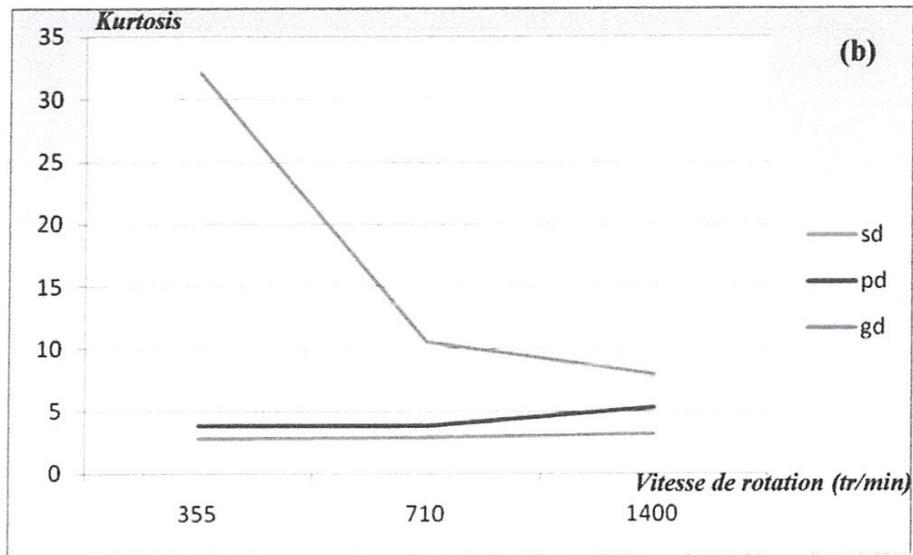
GDE : Grand Défaut sur la bague Extérieure

IV.2.2.1 Influence de la vitesse de rotation

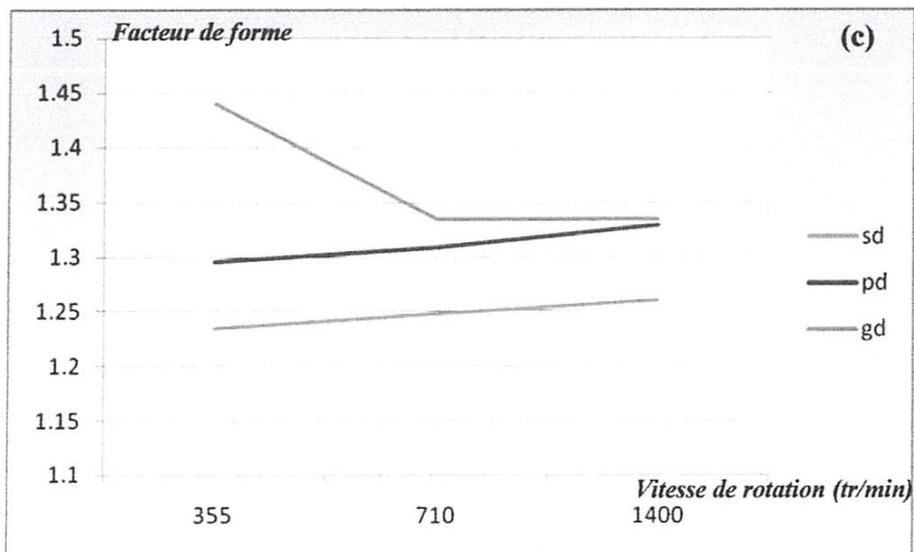
Facteur de crête



Kurtosis



Facteur de forme



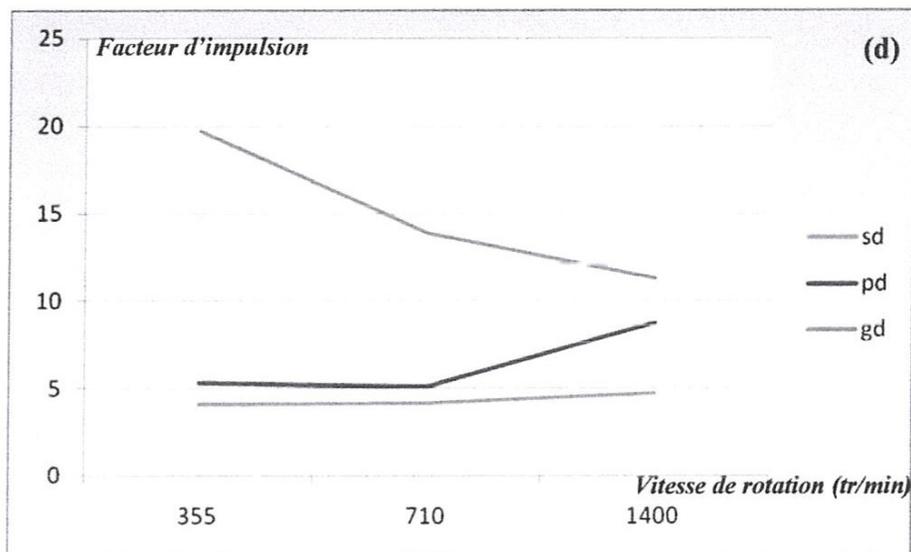
Facteur d'impulsion

Figure 2.6 : Influence de la vitesse de rotation

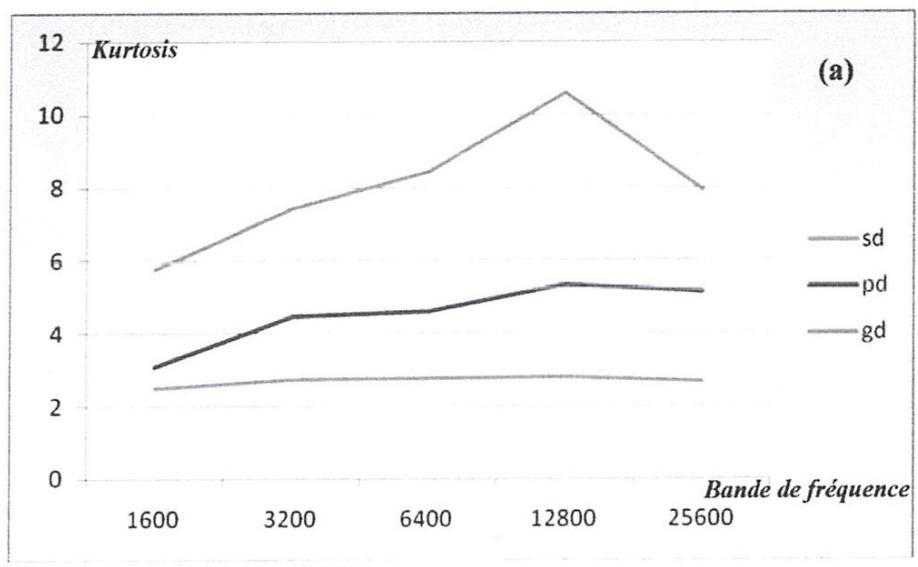
La figure (2.6) montre les valeurs du kurtosis, du facteur de crête, du facteur de forme et du facteur d'impulsion pour trois vitesses de rotation différentes pour le cas d'un petit et d'un grand défaut sur la bague extérieure. Alors que pour le cas sans défaut les valeurs sont au dessous des seuils significatifs, elles augmentent pour le cas d'un petit défaut pour atteindre des valeurs importantes pour celui d'un grand défaut. Notons également que les quatre indicateurs suivent une tendance parfaitement identique.

Pour le cas d'un petit défaut les quatre indicateurs augmentent légèrement avec l'augmentation de la vitesse, ceci est dû probablement au fait que le défaut est peu prononcé. Pour le cas d'un grand défaut, les quatre indicateurs diminuent avec l'augmentation de la vitesse de rotation ce qui concorde parfaitement avec la littérature pour le kurtosis et le facteur de crête. En plus ce résultat concorde parfaitement avec celui de la simulation concernant la fréquence de choc, car cette fréquence étant proportionnelle à la vitesse de rotation du roulement peut la représenter en simulation.

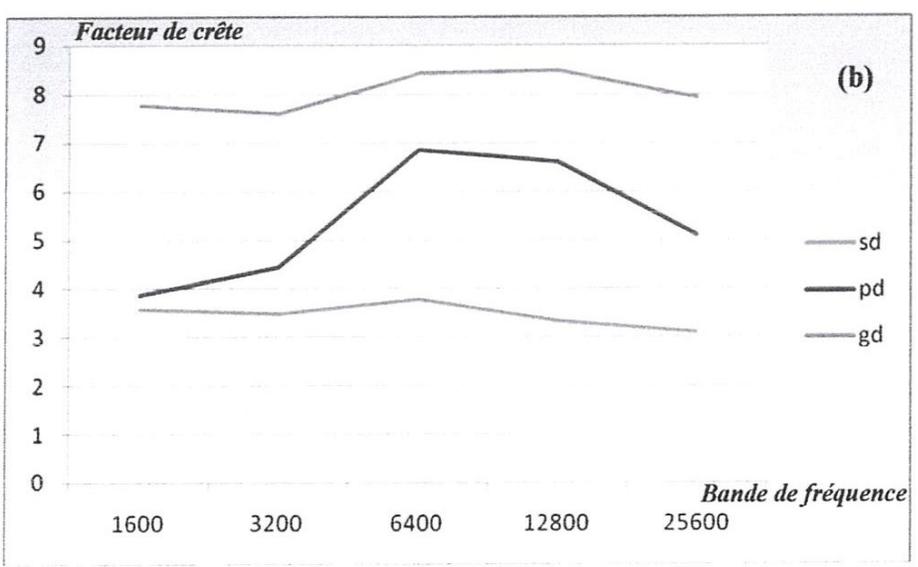
En conclusion, pour ce qui est de la vitesse de rotation, le facteur de forme et le facteur d'impulsion agissent de la même façon que le kurtosis et le facteur de crête. Ce résultat confirme qu'ils sont sensibles à la forme du signal et non pas à son énergie.

IV.2.2.2 Influence de la bande de fréquence

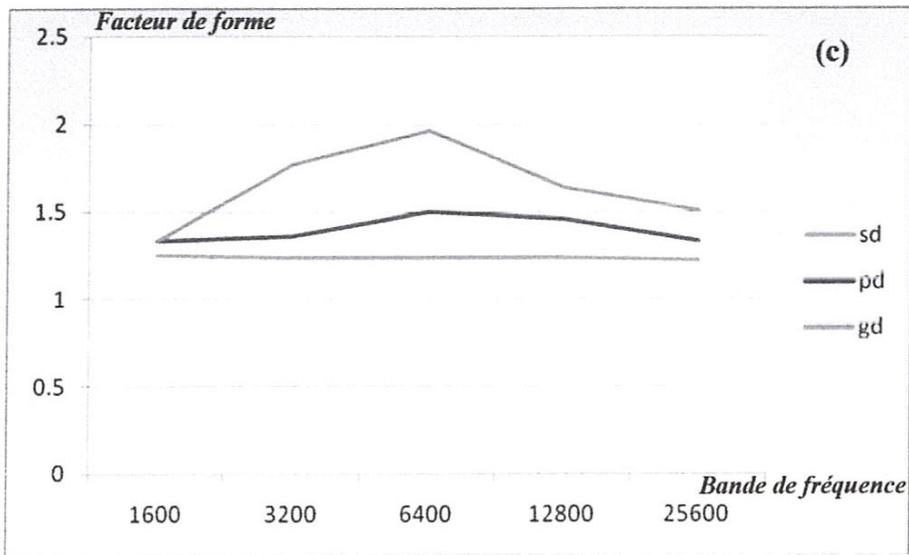
Kurtosis



Facteur de crête



Facteur de forme



Facteur d'impulsion

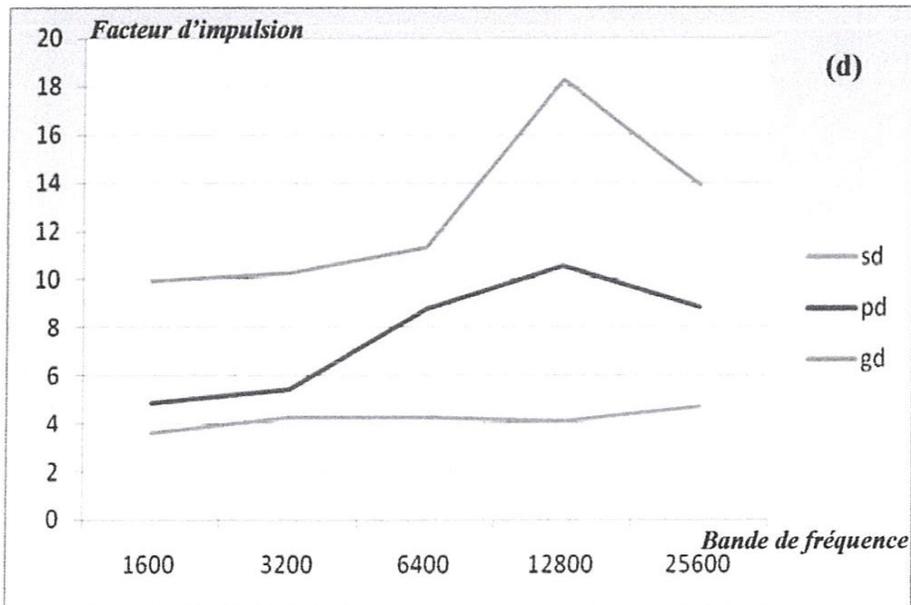
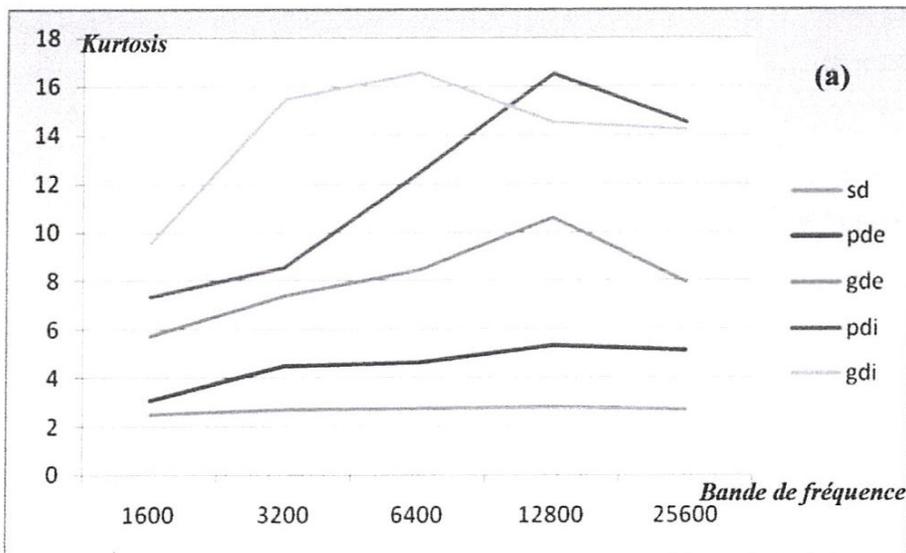


Figure 4.7 : Influence de la bande de fréquence

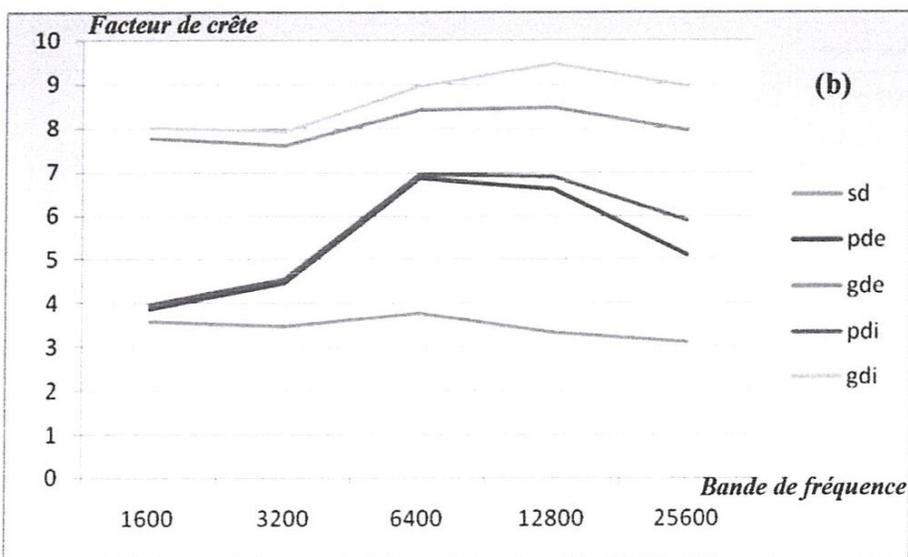
D'après les résultats de la figure (4.7) on constate que les quatre indicateurs suivent pratiquement la même tendance. Ils augmentent avec l'augmentation de la fréquence maximale sauf pour la plus grande fréquence (25600 Hz) où ils diminuent. Cette tendance était la même enregistrée lors de l'étude de l'influence de la fréquence d'échantillonnage dans la partie de la simulation.

IV.2.2.3 Influence du type et la gravité du défaut

Kurtosis



Facteur de crête



autre n'a pas une signification majeure car les défauts ne sont guère provoqués de la même gravité, même étant considérés petits ou grands.

IV.3 Comparaison entre les quatre indicateurs

Afin de faire une comparaison entre les quatre indicateurs scalaires et déduire celui le plus sensible, nous avons entamé une étude statistique portant sur le pourcentage de détection de chaque indicateur pour le cas d'un petit défaut. Pour le cas d'un grand défaut la comparaison n'a pas de sens car tous les indicateurs sont en mesure de le détecter. L'idée consiste à recenser les cas où chaque indicateur a dépassé le seuil de détection qui lui est défini à savoir 3 pour le kurtosis, 1,27 pour le facteur de forme et 6 pour le facteur de crête et le facteur d'impulsion.

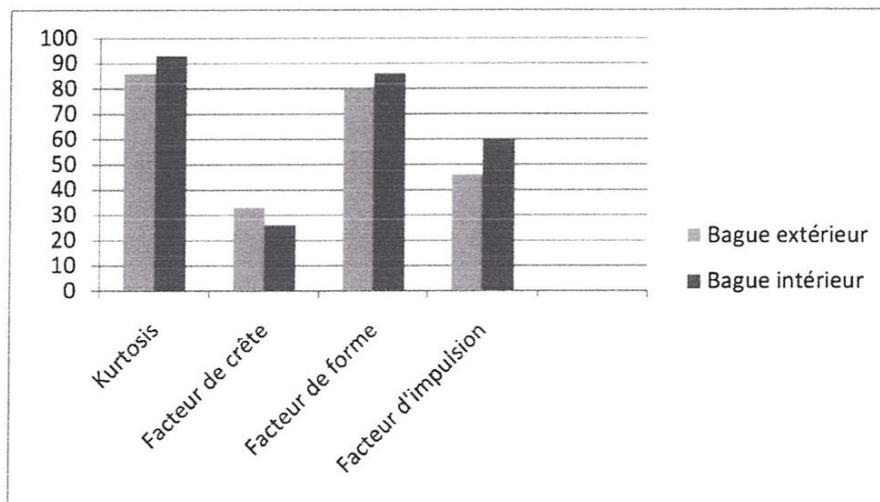


Figure 4.9 : Comparaison entre les quatre indicateurs

La figure (4.9) montre que le kurtosis est l'indicateur le plus sensible pour la détection des défauts de roulements, avec un taux de détection d'environ 90% pour les deux types de défaut. En deuxième place vient le facteur de forme avec un taux de détection de 83%. Le facteur d'impulsion vient en troisième place avec un taux de détection d'environ 53%, qui est tout juste moyen. Enfin le facteur de crête vient en dernière position avec un taux de détection très faible, inférieur à 30%.

IV.4 Conclusion du chapitre

Ce chapitre était destiné à la présentation des résultats expérimentaux réalisés sur des roulements sains et endommagés montés sur un banc d'essais adéquat. La première partie de ce chapitre concerne la présentation des détails de la campagne de mesures : caractéristiques des roulements utilisés, paramètres étudiés, montage conçu, ... etc.

La deuxième partie concerne la présentation des résultats expérimentaux. Pour le cas sans défaut, les résultats confirment et corrigent les seuils de détection définis par la simulation numérique. L'étude de la tendance des quatre indicateurs en fonction de plusieurs paramètres montre qu'ils ont pratiquement la même allure, ceci confirme que le facteur de forme et le facteur d'impulsion sont proportionnels à la forme du signal et non pas à sa forme ce qui les place en tant qu'indicateurs fiables de la détection des défauts de roulements.

Enfin une étude comparative entre les taux de détection des quatre indicateurs a été entamée pour le cas d'un petit défaut. Les résultats montrent que le kurtosis et le facteur de forme ont des taux de détection très élevés. Pour le facteur d'impulsion le taux est juste moyen alors qu'il est très faible pour le facteur de crête.

Résumé

Ce mémoire était consacré à l'étude de l'apport des indicateurs scalaires dans la détection des défauts de roulement. L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier plus profondément deux nouveaux indicateurs scalaires et les comparer avec ceux déjà existants dans le domaine de la détection des défauts de roulements.

Le mémoire comporte une simulation numérique réalisée sur un modèle mathématique où des seuils de détection de ces deux indicateurs ont été définis. Une analyse de leur tendance en fonction de plusieurs paramètres a été effectuée et ainsi comparée avec celle de cinq autres indicateurs. Une validation expérimentale a été également réalisée sur des roulements sains et défectueux où plusieurs paramètres ont été étudiés.

Enfin, le travail réalisé dans ce mémoire a permis de mettre en évidence l'apport considérable de deux nouveaux indicateurs scalaires qui se montrent bien adaptés pour la détection des défauts de roulements.

Mots-clés : Analyse vibratoire, Indicateurs scalaires, Simulation numérique, Défauts de roulements.