

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2021



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electromécanique

Spécialité: Electromécanique

Par: BOUZID Mohamed Tayeb et GAT Khaled

Thème

**Diagnostic vibratoire des machines tournantes fonctionnant
en régime variable : Etude théorique et expérimentale**

Soutenu publiquement, le 14/07/2021 devant le jury composé de:

Mr DJEBALA Abderrazek	Professeur	Univ. Guelma	Encadreur
Mr OULDLAHOUCINE Cherif	Professeur	Univ. Guelma	Président
Mme FRIOUI Nadia	MCB	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire: 2020/2021

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la détection des défauts de roulements par analyse vibratoire. Le travail a été entamé pour les deux régimes de fonctionnement du roulement. En régime constant deux approches distinctes ont été appliquées ; l'une temporelle et l'autre fréquentielle. L'approche temporelle est basée sur l'utilisation de quatre indicateurs scalaires : le kurtosis, le facteur de crête, le RMS et la valeur crête, l'approche fréquentielle est basée sur l'utilisation du spectre d'enveloppe. En deuxième lieu, une démarche pour la détection des défauts de roulements en régime variable par application de l'analyse d'ordre a été proposée.

Les résultats obtenus ont prouvé la validité des méthodes proposées dans différentes configurations et pour trois types de défauts : sur la bague extérieure, intérieure et sur la bille. Plusieurs paramètres ont également été pris en considération afin d'optimiser les conditions d'utilisation des méthodes proposées, à savoir la vitesse de rotation, la taille du défaut et son type, et la charge appliquée au roulement.

Mots clés : Diagnostic vibratoire, régime constant, régime variable, approche temporelle, approche fréquentielle

Abstract

The work presented in this thesis focuses on the detection of bearing defects by vibration analysis. Two bearing's operating modes have been considered. In constant regime, two distinct approaches were applied in time and frequency domains. The temporal approach is based on the use of four scalar indicators: kurtosis, crest factor, RMS and peak value, while the frequency approach is based on the use of the envelope spectrum analysis. Secondly, an approach for the detection of bearing faults in variable regime by applying order analysis has been proposed.

The results obtained proved the validity of the proposed methods in different configurations and for three types of defects: on the outer race, the inner race and on the ball. Several parameters have also been taken into consideration in order to optimize the conditions of use of the proposed methods, namely the rotation speed, the size of the defect and its type, and the load applied to the bearing.

Keywords: Vibration diagnosis, constant regime, variable regime, temporal approach, frequency approach

المخلص

يركز العمل المقدم في هذه الرسالة على الكشف عن عيوب المحامل عن طريق تحليل الاهتزازات. في النظام الثابت تم تطبيق نهجين متميزين، يعتمد النهج الزمني على استخدام أربعة مؤشرات عديدة أما نهج التردد فيعتمد على استخدام طيف الغلاف. ثانيًا، تم اقتراح نهج لاكتشاف عيوب المحامل في السرعة المتغيرة من خلال تطبيق Order analysis.

أثبتت النتائج التي تم الحصول عليها صحة الطرق المقترحة في التكوينات المختلفة ولثلاثة أنواع من العيوب: على الحلقة الخارجية والحلقة الداخلية وعلى الكرة. كما تم أخذ العديد من المؤشرات في الاعتبار من أجل تحسين شروط استخدام الطرق المقترحة، وهي سرعة الدوران وحجم العيب ونوعه والحمل المطبق على المحمل.

الكلمات المفتاحية: تشخيص الاهتزاز، السرعة الثابتة، السرعة المتغيرة، النهج الزمني، نهج التردد

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1. Les différents types de maintenance	03
Figure 1.2. Transformée en ondelette par multi résolution	09
Figure 1.3. Décomposition de signal en approximations et détails	09
Figure 1.4. Exemple d'une analyse vibratoire d'une machine tournante ...	11
Figure 1.5. Constituants d'un roulement.....	12
Figure 1.6. Défauts réels de roulements : répartis (a) et localisés (b).....	14
Figure 1.7. Criques de corrosion sur une piste de roulement	15
Figure 1.8. Mécanismes généraux d'usure en présence de contaminant	16
Figure 1.9. Caractéristiques géométriques d'un roulement.....	17
Figure 1.10. Défaut de type écaillage affectant la bague intérieure.....	17
Figure 1.11. Défaut de type écaillage affectant la bague extérieure.....	18
Figure 1.12. Défaut de type écaillage sur un élément roulant.....	19
Figure 1.13. Les différentes étapes du diagnostic industriel.....	20

Chapitre 2

Figure 2.1. Banc d'essai de roulement de « Bearing Data Center ».....	23
Figures 2.2. Influence de la charge pour le cas sans défaut avec le capteur monté côté accouplement.....	24, 25, 26
Figure 2.3. Influence de la charge pour le cas sans défaut avec le capteur monté côté ventilateur	26 , 27 , 28
Figure 2.4. Influence de la charge pour le cas d'un défaut sur la bille avec le capteur monté côté accouplement.....	29, 30
Figure 2.5. Influence de la charge pour le cas d'un défaut sur la bille avec le capteur monté côté ventilateur	31, 32

Figure 2.6. Influence de la charge pour le cas d'un défaut sur la bague extérieure avec le capteur monté côté accouplement	33, 34
Figure 2.7. Influence de la charge pour le cas d'un défaut sur la bague extérieure avec le capteur monté côté ventilateur	35 , 36
Figure 2.8. Influence de la charge pour le cas d'un défaut sur la bague intérieure avec le capteur monté côté accouplement	37, 38, 39
Figure 2.9. Influence de la charge pour le cas d'un défaut sur la bague intérieure avec le capteur monté côté ventilateur	39, 40 ,41
Figure 2.10. Influence de la gravité du défaut pour le cas d'un défaut sur la bille avec le capteur monté côté accouplement	42, 43
Figure 2.11. Influence de la gravité du défaut pour le cas d'un défaut sur la bille avec le capteur monté côté ventilateur	44, 45
Figure 2.12. Influence de la gravité du défaut pour le cas d'un défaut sur la bague extérieure avec le capteur monté côté accouplement	46, 47, 48
Figure 2.13. Influence de la gravité du défaut pour le cas d'un défaut sur la bague extérieure avec le capteur monté côté ventilateur	48, 49, 50
Figure 2.14. Influence de la gravité du défaut pour le cas d'un défaut sur la bague intérieure avec le capteur monté côté accouplement	51, 52
Figure 2.15. Influence de la gravité du défaut pour le cas d'un défaut sur la bague intérieure avec le capteur monté côté ventilateur.....	53, 54
Figure 2.16. Signal d'accélération mesuré et son spectre.....	55
Figure 2.17. Signal d'accélération filtré et son spectre d'enveloppe	56
Figure 2.18. Signal de l'accélération mesuré et son spectre	57
Figure 2.19. Signal de l'accélération filtré et son spectre d'enveloppe	57
Figure 2.20. Signal de l'accélération mesuré et son spectre.....	58
Figure 2.21. Signal de l'accélération filtré et son spectre d'enveloppe	59
Figure 2.22. Signal de l'accélération filtré et son spectre d'enveloppe avec capteur monté côté ventilateur.....	59

Chapitre 3

Figure 3.1. Principe du ré-échantillonnage angulaire	62
Figure 3.2. Signal vibratoire mesuré dans la cabine d'un hélicoptère (en haut) et son signal RPM (en bas)	63
Figure 3.3. Représentation temps-ordre du signal de la figure (3.2).....	63
Figure 3.4. Spectre d'ordre du signal de la figure (3.2).....	64
Figure 3.5. Photo du banc d'essais MFS.....	67
Figure 3.6. Organes constitutifs du simulateur (vue de face).....	68
Figure 3.7. Montage du roulement testé dans son logement	69
Figure 3.8. Signal de l'accélération mesuré et son spectre	70
Figure 3.9. Signal de l'accélération filtré et son spectre d'enveloppe.....	70
Figure 3.10. Spectre d'enveloppe d'ordre dans le cas d'un défaut sur la Bague extérieure en cas d'accélération	71
Figure 3.11. Signal de décélération mesuré et son spectre.....	72
Figure 3.12. Signal de décélération filtré et son spectre d'enveloppe.....	72
Figure 3.13. Spectre d'enveloppe d'ordre dans le cas d'un défaut sur la bague extérieure en cas de décélération.....	73
Figure 3.14. Signal de l'accélération mesuré et son spectre.....	74
Figure 3.15. Signal de l'accélération filtré et son spectre d'enveloppe.....	74
Figure 3.16. Spectre d'enveloppe d'ordre dans le cas d'un défaut sur la bague intérieure en cas de d'accélération	75

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Paramètres permettant de détecter un défaut sur une machine.....	11
Tableau 1.2. Défauts indépendants de fatigue	13
Tableau 1.3. Défauts dépendants de fatigue	13
Tableau 2.1. Fréquences caractéristiques des défauts de roulement pour différents couples résistants	23
Tableau 3.1. Définition des ordres des défauts de roulements	65
Tableau 3.2. Caractéristiques géométriques et ordres des défauts pour les roulements utilisés	69

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Généralités et notions fondamentales

1. Notions sur la maintenance.....	2
2. Maintenance conditionnelle.....	4
3. L'analyse vibratoire.....	4
4. Le diagnostic vibratoire des défauts dans les machines tournantes.....	10
5. Les roulements.....	11
6. Méthodes de détection de défauts de roulements.....	19
7. Conclusion du chapitre.....	21

Chapitre II : Détection des défauts de roulements en régime constant

1. Présentation de banc d'essais.....	22
2. Application de l'approche temporelle	24
3. Application de l'approche fréquentielle.....	55
4. Conclusion du chapitre.....	60

Chapitre III : Détection des défauts de roulements en régime variable

1. L'analyse d'ordre	61
2. Plan expérimental et matérielles de mesure.....	65
3. Résultats et discussion	70
4. Conclusion du chapitre	76

Conclusion générale.....	77
---------------------------------	-----------

Introduction Générale

Les machines industrielles vibrent pendant leur fonctionnement, qu'elles soient en état neuf ou en état de défaillance. Le niveau de dégradation est donné ou quantifié par un indicateur calculé par un traitement du signal. Les indicateurs de surveillance et de diagnostic sont nombreux, on trouve des indicateurs statistiques, spectraux, énergétiques, ...etc.

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.

L'objectif de ce mémoire est la détection des défauts de roulements en régime constant et variable par application de deux approches : l'une temporelle basée sur le calcul de quatre indicateurs scalaires, et l'autre fréquentielle basée sur le spectre d'enveloppe. Deux régimes de fonctionnement du roulement sont considérés : celui constant et celui variable. Bien évidemment, dans le régime variable et pour éliminer l'effet de la variation de la vitesse, l'analyse d'ordre a été utilisée.

La validité des méthodes utilisées est prouvée sur des signaux expérimentaux mesurés sur des roulements sains et défectueux dans différentes configurations et dans les deux régimes.

Le présent travail est structuré en trois chapitres suivis d'une conclusion générale. Nous consacrons le premier chapitre à un aperçu général sur le diagnostic des machines tournantes, en donnant les défauts de roulements qui

accrurent sur les machines tournantes. Nous présentons aussi quelques méthodes utilisées dans le domaine du traitement des signaux vibratoires.

Le chapitre 2 traite l'application des deux approches utilisées pour la détection des défauts de roulements en régime constant. Les signaux de roulements sains et endommagés ont été extraits de la base de données Américaine « Bearing Data Center », plusieurs paramètres ont été étudiés.

Le chapitre 3 comprend l'application de l'analyse d'ordre sur des signaux mesurés sur le banc d'essais MFS du Département de Génie Mécanique de l'Université de Guelma. Plusieurs types de défauts de roulements et plusieurs modes de variation de la vitesse ont été considérés.

Chapitre I : Généralités et Notions Fondamentales

Ce chapitre est consacré à la présentation de quelques notions de base sur la maintenance notamment celle par analyse vibratoire. Des notions sur le traitement du signal et ses applications dans le domaine de la détection des défauts de machines tournantes notamment ceux des roulements est également présenté

1 Notions sur la maintenance

Avec le développement de l'industrie, les solutions de maintenir le bon fonctionnement des machines tournantes dans les usines sont aussi devenues indispensables, car le rendement de ces dernières est attaché à la bonne méthode de maintien et de maintenance.

1.1 Définition de la maintenance

Une première définition normative de la maintenance est donnée par l'AFNOR en 1994 (norme NFX 60-010), à savoir « *l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé* ». Depuis [2001](#), elle a été remplacée par une nouvelle définition, désormais Européenne (NF EN 13306 X 60-319) : « *Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise* ». La Fédération européenne des sociétés nationales de maintenance (*Européen Fédération of National Maintenance Sociétés* ou *EFNMS*) propose une définition similaire en anglais : « *All actions which have the objective of retaining or restoring an item in or to a state in which it can perform its required function. The actions include the combination of all technical and corresponding administrative, managerial, and supervision*

actions ». Littéralement : « Toutes les actions qui ont pour objectif de garder ou de remettre une chose en état de remplir la fonction qu'on exige d'elle. Ces actions regroupent toutes les actions techniques et toutes les actions d'administration, de direction et de supervision correspondantes ». [1]

1.2 Objectifs de la maintenance

La maintenance est le soutien de la production qui a pour objets :

- Disponibilité des matériels pour assurer la continuité de la production ;
- Protège le parc matériel et augmenter sa durée de vie ;
- Sécurité du personnel ;
- La qualité du produit, ...etc.

1.3 Types de maintenance

La figure (1.1) résume les différents types de maintenance largement discutés dans la littérature.

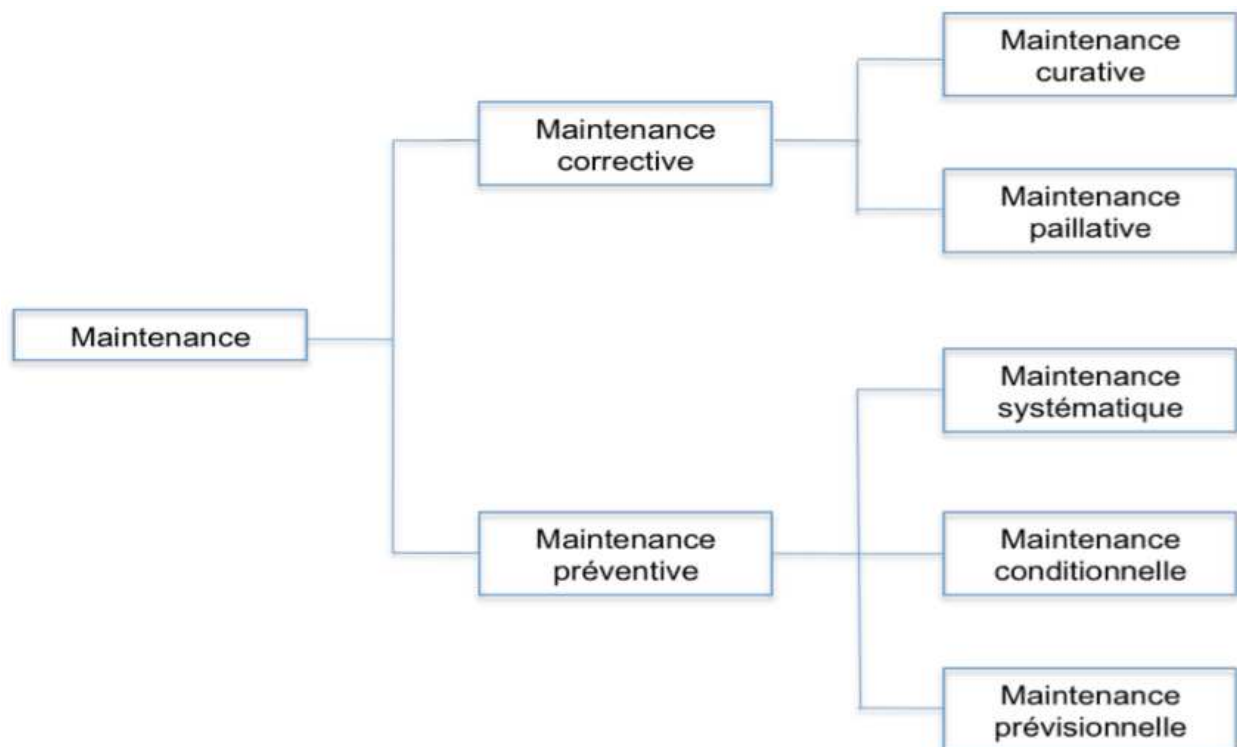


Figure 1.1. Les différents types de maintenance

2 Maintenance conditionnelle

La maintenance conditionnelle est définie comme une : « *Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent* ». C'est une maintenance subordonnée à un type d'événement prédéterminé. Divers outils comme l'analyse de la vibration et l'analyse d'huile, permettent de détecter les signes d'usure ou de dégradation de l'équipement. Ceci s'effectue en mesurant, à chaque inspection, la valeur d'un paramètre de contrôle tel que l'amplitude de déplacement, de vitesse ou d'accélération des vibrations, le degré d'acidité, ou la teneur de particules solides dans l'huile.

Dans certains cas où des équipements de mesure ou des capteurs sont intégrés dans le système de suivi, l'inspection ne se fait qu'après l'obtention d'un signal. D'une manière générale, l'action ne se déclenche que lorsque le paramètre de contrôle dépasse un seuil déterminé empiriquement, fixé par le constructeur ou par les normes de santé et de sécurité au travail. Cette maintenance préventive conditionnelle se fait par des mesures pertinentes sur le matériel en fonctionnement. Les paramètres mesurés peuvent porter sur : [1]

- o Le niveau et la qualité de l'huile ;
- o Les températures et les pressions ;
- o La tension et l'intensité des matériels électriques ;
- o Les vibrations et les jeux mécanique ;
- o Etc.

3 L'analyse vibratoire

Les vibrations des machines sont considérées comme la réponse de la fonction de transfert de leurs structures aux différents efforts auxquels elles sont sollicitées. La surveillance des vibrations de ces structures peut permettre donc de déceler l'apparition d'efforts perturbateurs à un stade précoce, permettant par la même

occasion, de détecter ou d'avorter l'apparition de défaillances. En plus de son efficacité, la facilité relative de son installation rend l'analyse des signaux vibratoires une des techniques les plus utilisées pour la surveillance et le diagnostic des défauts des machines tournantes dans l'industrie. Il existe plusieurs techniques pour analyser les vibrations générées par la machine tournante : [2]

3.1 Indicateurs scalaires

Cette technique rapide, extrait des indicateurs, pour la plupart statistiques, résumant l'information contenue dans le signal et permettant de générer un repère. Le suivi d'évolution du repère donne une information plus ou moins précise et complète sur son état de fonctionnement. Une multitude d'indicateurs existent plus ou moins performants et adéquats pour le dépistage de certaines défaillances plus que d'autres. Les indicateurs les plus utilisés sont décrits comme suit :

- a) **RMS** : Le RMS, nommée aussi valeur efficace ou moyenne quadratique d'un signal, est un des premiers indicateurs utilisés en industrie, dû notamment à sa simplicité et à sa rapidité d'exécution. Une variation excessive du niveau RMS signifie en général un changement de l'état de fonctionnement et donc une défaillance. Son expression mathématique est de la forme :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{Ne} \sum_{n=1}^{Ne} [s(t)]^2} \quad (1.1)$$

- b) **Facteur de crête** : c'est un indicateur de surveillance simple à calculer, car c'est le rapport entre la valeur crête du signal et sa valeur efficace (RMS), comme il peut se calculer par le rapport entre la valeur maximale du signal et son écart type. Son expression mathématique est de la forme :

$$F_c = \frac{V_{crete}}{RMS} \quad (1.2)$$

Cet indicateur est utilisé pour la détection spécifique d'impulsions ou de choc présents dans le signal vibratoire.

- c) **Kurtosis** : Plus spécifique au dépistage des défauts de roulements, le kurtosis approche la valeur de 3 pour un fonctionnement sans défauts de roulement, et augmente de façon remarquable dès l'apparition d'impulsions dues à la naissance d'un défaut. Le kurtosis tend à revenir à 3 dès que la dégradation entre en phase terminale. Son expression mathématique est de la forme :

$$\mathbf{Kurtosis} = \frac{\frac{1}{Ne} \sum_{n=1}^{Ne} [S(t) - \bar{S}]^4}{\left[\frac{1}{Ne} \sum_{n=1}^{Ne} [S(t) - \bar{S}]^2 \right]^2} \quad (1.3)$$

- d) **Moment d'ordre 3** : couramment appelé « **Skewness** », il représente le taux de dissymétrie de la distribution d'amplitudes du signal par rapport à la valeur moyenne. Il peut se calculer par l'expression :

$$\mathbf{M}_3 = \mathbf{S}_k = \frac{1}{\sigma^3} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^3 p(x) dx \quad (1.4)$$

3.2 Analyse spectrale

Le signal vibratoire extrait d'une machine tournante est très complexe, originaire des différents organes la composant. La transformée de Fourier est un outil mathématique permettant de transformer ces signaux complexes, de les décomposer en une multitude de composantes élémentaires sinusoïdales et de les représenter sous forme d'un spectre « Amplitudes-fréquence ». La transformée de Fourier rapide FFT développée par James Cooley et John Tukey, ne requiert qu'un temps de calcul minime pour appliquer la transformée de Fourier Discrète. La FFT a été largement implémentée dans les systèmes de diagnostic des machines tournantes. [3]. Son expression mathématique est de la forme :

$$\mathbf{X}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{x}(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1.5)$$

Où : $X(f)$ est la transformée de Fourier, $x(t)$ est le signal temporel, t est la variable temps, f est la variable fréquence.

Dans des conditions de fonctionnement stationnaires « vitesses de rotations et chargements stationnaires », chaque organe de la machine émet des vibrations à un certain niveau d'amplitude, et à une cadence « fréquence » constante dans le temps. L'apparition de défauts dans les organes de la machine tournante génère des efforts supplémentaires qui se traduisent par des vibrations se répétant à une cadence « fréquence » constante ($f_{b \text{ int}}$, $f_{b \text{ ext}}$, f_{bille} dans le cas des roulements), relative à la fréquence de rotation. Suivre les amplitudes des vibrations à ces fréquences, permet de suivre les conditions de fonctionnement des différents organes de la machine tournante.

3.3 Analyse cepstrale

L'analyse cepstrale est une technique complémentaire d'analyse, développée sur plusieurs variantes, dont les plus utilisées sont le cepstre complexe défini comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal de la transformée de Fourier, s'exprime selon une variable uniforme au temps, et est représentée par la formule : [3]

$$C = TF^{-1}[\text{Ln}|X(f)|] \quad (1.6)$$

De même que la transformée de Fourier permet de mettre en évidence les périodicités d'un signal temporel, le cepstre met en évidence les périodicités de sa transformée de Fourier. Opinant par la même occasion, de rechercher, d'identifier et de quantifier rapidement toute les familles de composantes périodiques qui peuvent se manifester dans le spectre sous forme de peignes de raies ou bandes latérales de modulation autour d'une fréquence caractéristique ce qui n'est pas toujours évident dans le cadre de l'analyse spectrale. Les unités et grandeurs sont autres dans le cepstre que ceux utilisés dans l'analyse spectrale, ainsi on trouve entre autres; les périodicités qui sont appelées « Quéfrences » et

sont exprimées en secondes ou millisecondes et les harmoniques qui deviennent des « Rahmoniques ».

3.4 Analyse d'enveloppe

L'analyse d'enveloppe est une technique de détection précoce des défauts de type choc. Pour ce faire le signal vibratoire est relevé dans une bande fréquentielle large, et filtré autour d'une fréquence de résonance. Le signal est ensuite redressé « en mettant au positive toutes les valeurs négatives », et la transformée d'Hilbert est appliquée afin de relever son enveloppe et ainsi dissocier le signal modulé (fréquences de résonance) du signal modulant correspondant au défaut recherché. Le diagnostic final pourra par la suite être rendu après analyse spectrale de l'enveloppe.

3.5 Analyse Temps-Fréquence

L'analyse spectrale classique basée sur la transformée de Fourier présente un sérieux inconvénient, vu qu'elle suppose que la majorité des signaux sont infinis dans le temps ou périodiques, alors qu'en réalité ils peuvent être de courte durée et comporter des variations au cours du temps d'acquisition. Pour pallier cet inconvénient, des techniques ont été développées analysant les variations fréquentielles au cours du temps. Parmi ces techniques on trouve, la transformée de Fourier à Court Terme, la Distribution de Wigner-Ville, ou les techniques à base d'ondelettes.

3.5.1 La transformée en ondelette (La multi-résolution)

Cette technique consiste à décomposer le signal avec la transformée en ondelette en passant par deux filtres. L'un est un passe bas pour avoir les approximations qui représentent l'allure générale du signal, et l'autre est un passe haut pour avoir ses détails. Le schéma de la figure (1.2) montre l'opération.

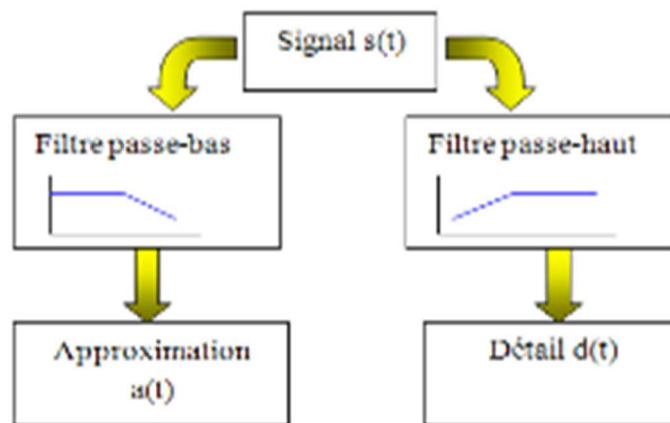


Figure 1.2. Transformée en ondelette par multi résolution

La forme générale de signal au cours de la décomposition est illustrée dans la figure (1.3).

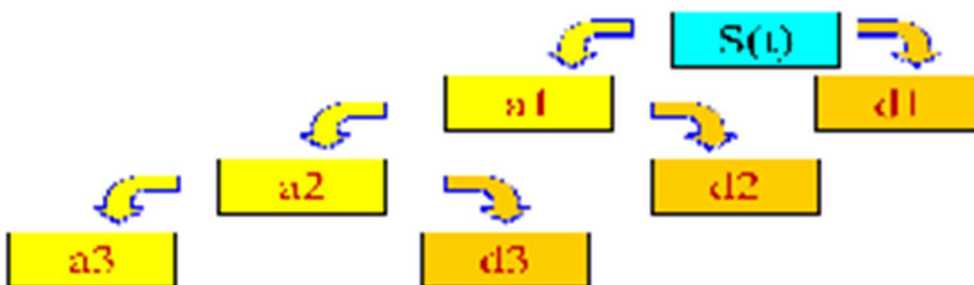


Figure 1.3. Décomposition de signal en approximations et détails

3.5.2 La Décomposition en Mode Empiriques (EMD)

L'EMD est une nouvelle méthode d'analyse des signaux, récemment introduite par HUANG et al. La décomposition en modes empiriques est une méthode d'itération au cours de laquelle chaque estimation de mode est retranchée du signal analysé et/ou l'estimation du mode suivant est conduite à partir du signal résidu. D'un autre sens, la décomposition en modes empiriques d'un signal en une série de composantes oscillantes extraites directement de celui-ci d'une manière

adaptative. Ces composantes (Intrinsic Mode Functions IMF) s'interprètent comme des formes d'ondes non stationnaires, modulées en amplitude et en fréquence. [4]

$$S(t) = \sum_{i=1}^n C_i + R_n \quad (1.7)$$

Ou $S(t)$ est le signal à décomposer, C_i sont les IMFs, n est le nombre des IMFs, R_n est le résidu.

4 Le diagnostic vibratoire des défauts dans les machines tournantes

L'analyse vibratoire est un outil puissant de détection des défauts des machines tournantes. Elle permet notamment de détecter les défauts se manifestant dans les organes sensibles. Ces différents défauts sont caractérisés par des fréquences de répétition fonction de paramètres connus. [5]

L'analyse des vibrations 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 par le déclenchement d'alarmes, lorsque le niveau des vibrations atteint des valeurs jugées excessives pour le bon fonctionnement ou l'intégrité de cette dernière. Il existe différentes techniques d'investigations utilisées dans le domaine du suivi vibratoire des machines tournantes. [6]

En outre, le diagnostic ne peut se faire que si les signaux vibratoires captés sont porteurs d'informations caractéristiques de l'état de fonctionnement des composants mécaniques. La qualité et la fiabilité d'une mesure vibratoire dépendent d'une part du matériel utilisé et de l'impédance de la structure d'autre part. La figure (1.4) montre l'exemple d'une analyse vibratoire d'une machine tournante. Le tableau (1.1) quant à lui montre quelques défauts courants des machines tournantes et les techniques de détection appropriées.

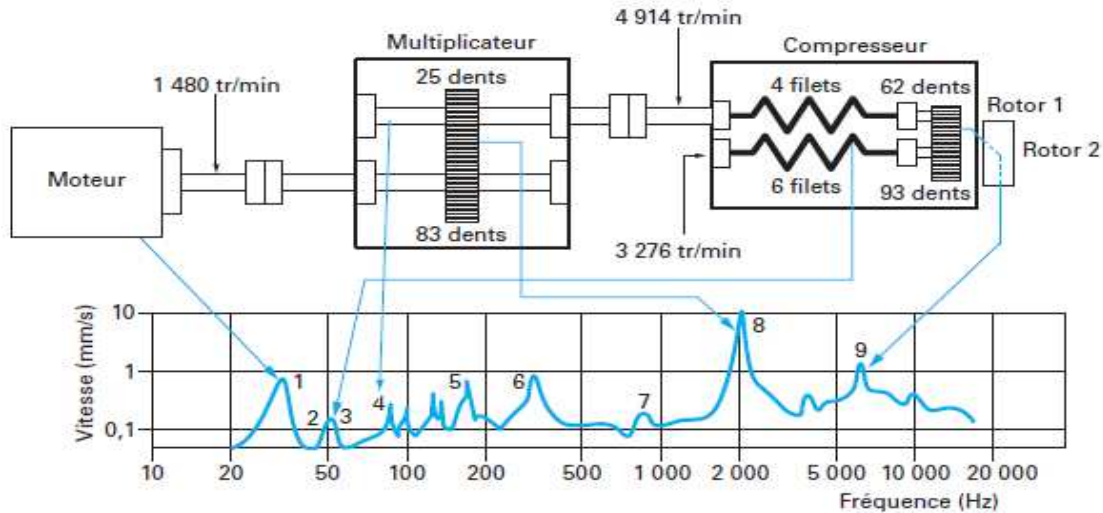


Figure 1.4. Exemple d'une analyse vibratoire d'une machine tournante

Paramètre	Température	Pression	Débit	Analyse d'huile	Vibration
Défauts					
Déséquilibre					•
Arbre non aligné – Flexion d'arbre	•				•
Roulement	•			•	•
Palier	•	•	•	•	•
Engrenage	•			•	•
Frottement	•				•

Tableau 1.1. Paramètres permettant de détecter un défaut sur une machine

5 Les roulements

Le roulement est un organe de base pouvant assurer à lui seul plusieurs fonctions parmi lesquelles la liaison mobile en rotation avec un minimum de frottement entre deux éléments, tout en supportant des charges radiales ou axiales plus ou moins importantes. Il peut être aussi utilisé pour assurer un positionnement précis de l'arbre, et corriger des défauts d'alignement. La figure (1.5) montre les éléments constitutifs d'un roulement.

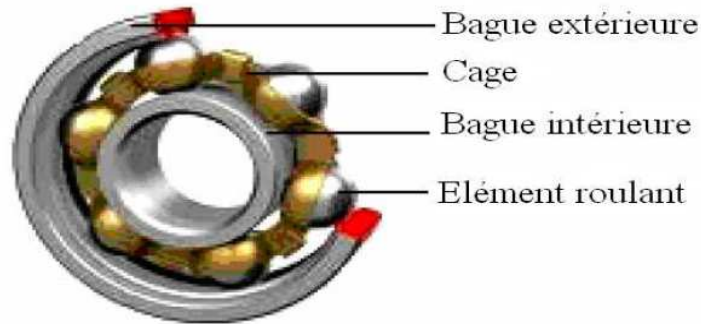


Figure 1.5. Constituants d'un roulement

5.2 Défauts liés aux paliers à roulements

C'est un défaut majeur de notre application industrielle. En effet, ces types de défauts sont la conséquence d'un balourd, d'un désalignement, d'un problème d'engrenage ou d'un manque de lubrification. Un roulement est constitué de deux bagues (externe et interne) l'une fixe et l'autre tournante avec le rotor. Elles sont séparées par un ensemble d'éléments roulants qui peuvent être des billes, des rouleaux ou des aiguilles, (on évoque ici le roulement à billes, le même développement peut être fait pour des rouleaux ou des aiguilles). La durée de vie du roulement est limitée par la fatigue superficielle des matériaux le constituant. Celle-ci est due aux contraintes créées par les passages répétitifs des billes sur les pistes. Les principales avaries touchant les roulements peuvent être classées en deux catégories : [7]

a) Défauts indépendants de la fatigue

Ces avaries peuvent être réduites et même éliminées par une bonne surveillance des causes de dégradation et un entretien approprié. Le tableau (1.2) résume ces défauts et les facteurs d'environnement s'y rapportant.

Mode d'avarie prématurée	Facteurs d'environnement
Usure	Choix du lubrifiant Contamination de l'huile
Grippage et échauffement	Faible épaisseur de film d'huile Charge et vitesse
Corrosion de contact	Vibration

Tableau 1.2. Défauts indépendants de fatigue

b) Défauts dépendants de la fatigue

Le tableau (1.3) résume ces défauts et les facteurs d'environnement s'y rapportant.

Mode d'avarie prématurée	Facteurs d'environnement
Ecaillage par inclusion	Vitesse et charge - Zone de charge – Faible épaisseur de film d'huile
Ecaillage par concentration de Contraintes	Défaut d'alignement - Zone de charge – Faible épaisseur de film d'huile
Ecaillage par origine ponctuelle en surface	Aspérités de surface - Faible épaisseur de film d'huile
Ecaillage superficiel	Faible épaisseur de film d'huile
Fatigues-en sous couche	Charge
Fissuration transversale	Fatigue aggravée par les conditions de Fonctionnement

Tableau 1.3. Défauts dépendants de fatigue

Ce type d'avaries se manifeste par l'apparition de fissures qui croient lentement jusqu'à l'écaillage, c'est un phénomène aléatoire. Il existe deux types de fissures : les fissures liées à la fatigue du roulement en charge (couche profonde et/ou

couche superficielle) et les fissures microscopiques qui existent avant la mise sous charge, sous l'effet de la finition des surfaces. La figure (1.6) montre deux photos de défauts réels de roulements, réparti (usure) et localisé (écaillage).

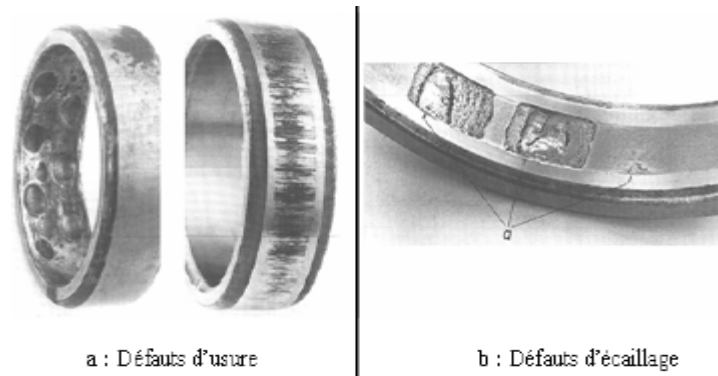


Figure 1.6. Défauts réels de roulements : répartis (a) et localisés (b)

5.3 Sources des défauts sur les roulements à billes

a) Montage

Ce type de défaut est dû à un mauvais montage du roulement, c'est à dire à une erreur humaine.

b) Corrosion

Des agents corrosifs, tels que des acides, sont susceptibles de s'introduire dans les roulements et de dégrader les matériaux métalliques les constituant. Des criques apparaissent alors sur les bagues et les billes, comme l'illustre la figure (1.7). [8]

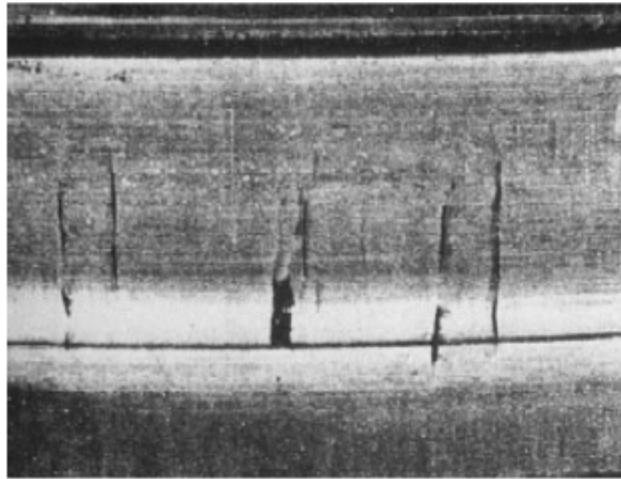


Figure 1.7. Criques de corrosion sur une piste de roulement

c) Défaut de lubrification

Le lubrifiant est un organe essentiel des roulements dans la mesure où il crée un film d'huile protecteur au niveau des contacts bille/bague permettant de protéger les surfaces. Deux types de défauts de lubrification principaux peuvent se présenter. Le premier est une dégradation des qualités lubrifiantes de la graisse ou de l'huile ou bien une absence de lubrifiant. En effet, en l'absence de lubrifiant, les surfaces métalliques se trouvent en contact direct, frictionnent et s'érodent rapidement, jusqu'à entraîner des écaillages des pistes, des éclatements des billes, un blocage et donc une destruction du roulement (figure 1.8). [9]

Le second type de défaut de lubrification intervient dans les roulements par l'intermédiaire d'un sur-graissage (la graisse occupe tout le volume libre interne au roulement). Dans ce cas, la viscosité de la graisse empêche la libre rotation de la cage et par conséquent des billes, ce qui entraîne un glissement de ces dernières au niveau des points de contact. Les surfaces de contact se dégradent alors rapidement.

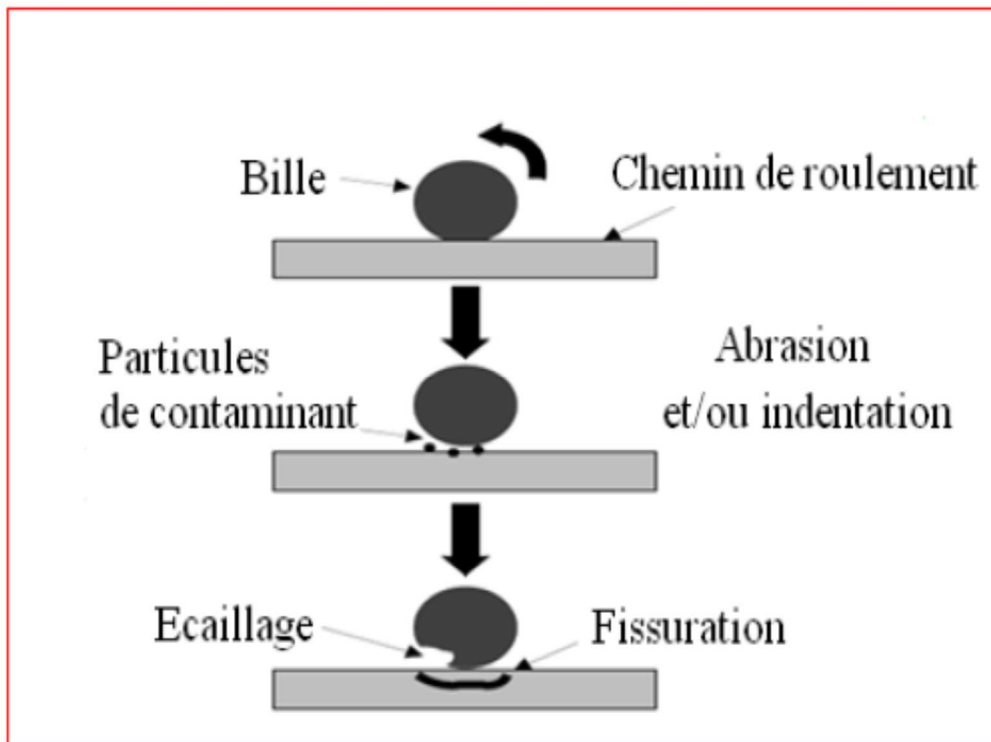


Figure 1.8. Mécanismes généraux d'usure en présence de contaminant

5.4 Fréquences caractéristiques des défauts d'un roulement

Les roulements défectueux génèrent des vibrations de fréquences égales aux vitesses de rotation de chaque pièce du roulement. Ils correspondent notamment à la rotation des billes, des rouleaux ou de la cage et au passage des billes sur les bagues. Pour chaque type de roulement, et en fonction de ses cotes de fabrication, on peut considérer les fréquences caractéristiques données par des équations. La figure (1.9) montre les caractéristiques géométriques d'un roulement entrant dans les équations de calcul des fréquences des défauts.

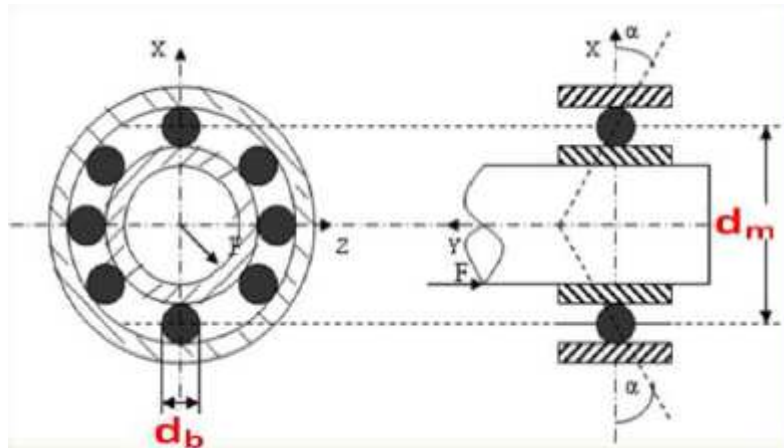


Figure 1.9. Caractéristiques géométriques d'un roulement

N : Nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles)

d_m : Diamètre primitif

d_b : Diamètre des éléments roulants

α : Angle de contact

a) **Fréquence d'un défaut localisé sur la bague intérieure**

La fréquence d'un défaut sur la bague intérieure est donnée par l'équation suivante :

$$F_{b\text{int}} = \frac{N}{2} f_r \left(1 + \frac{d_b}{d_m} \cos \alpha \right) \quad (1.8)$$

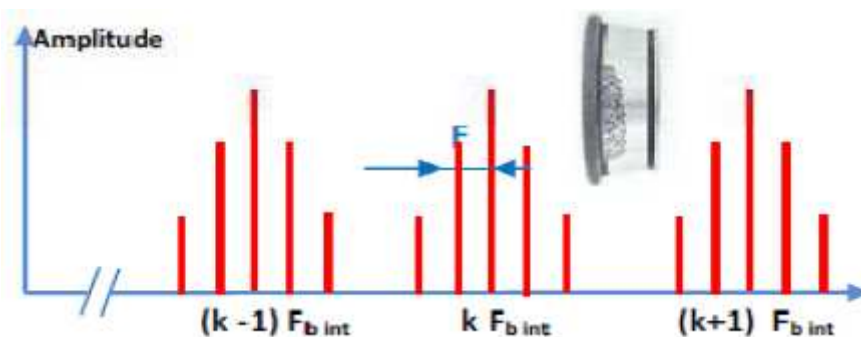


Figure 1.10. Défaut de type écaillage affectant la bague intérieure

b) Fréquence d'un défaut localisé sur la bague extérieure

La fréquence d'un défaut sur la bague extérieure est donnée par l'équation suivante

$$F_{d_{be}} = \frac{N}{2} f_r \left(1 - \frac{db}{dm} \cos \alpha \right) \quad (1.9)$$

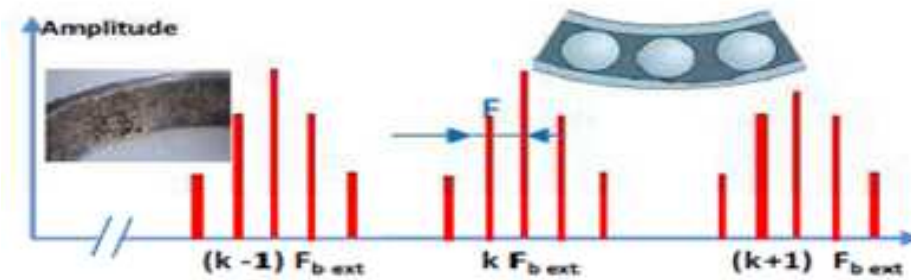


Figure 1.11. Défaut de type écaillage affectant la bague extérieure

c) Fréquence d'un défaut sur la cage

La fréquence de passage d'un défaut de cage est donnée par l'équation suivante :

$$f_c = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{db}{dm} \cos \alpha \right) \quad (1.10)$$

d) Fréquence d'un défaut localisé sur un élément roulant

La fréquence de passage d'un défaut de bille (ou de rouleau), sur la bague extérieure ou sur la bague intérieure, est donnée par l'équation suivante :

$$f_b = \frac{dm}{db} f_r \left[\left(1 + \frac{db}{dm} \cos \alpha \right)^2 \right] \quad (1.11)$$

La première fréquence caractéristique de défaut correspond à la fréquence de rotation de l'élément roulant sur lui-même. De plus, cet élément roulant rencontre une fois la bague intérieure et une fois la bague extérieure par tour, il génère donc des chocs à 2 fois cette fréquence.

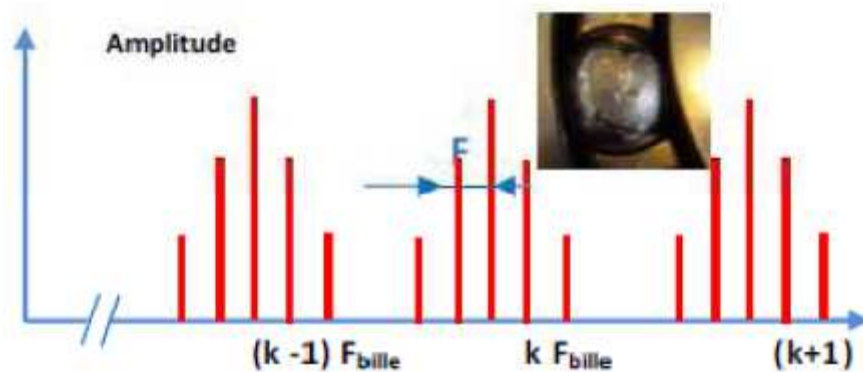


Figure 1.12. Défaut de type écaillage sur un élément roulant

6 Méthodes de détection des défauts de roulements

6.1 La surveillance

La surveillance est l'observation « une observation systématique et significative ». La surveillance est un dispositif passif informationnel qui analyse l'état du système et fournit des indicateurs. La surveillance consiste notamment à **détecter** et **classer** les défaillances en observant l'évolution du système puis à les **diagnostiquer** en **localisant** les éléments défaillants et en identifiant les premières causes. La surveillance se compose donc de deux fonctions principales qui sont la **détection** et le **diagnostic**.

6.2 La détection

Pour **détecter** les défaillances d'un système, il faut être capable de classer les situations observables comme étant **normales** ou **anormales**. Cette classification n'est pas triviale, étant donné le manque d'information qui caractérise

généralement les situations anormales. Une simplification communément adoptée consiste à considérer comme anormale toute situation qui n'est pas normale.

6.3 Le diagnostic

Le diagnostic est un outil particulièrement utile dans le cadre de la mise en place d'un concept de maintenance prévisionnelle. La démarche du diagnostic repose sur l'analyse systématique du signal vibratoire et le suivi de son évolution dans le temps en analysant son allure temporelle et spectrale afin d'identifier l'existence de défaut ou non.

6.3.1 Deux tâches essentielles en diagnostic (figure 1.13):

- Observer les symptômes de défaillance ;
- Identifier la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur des observations.

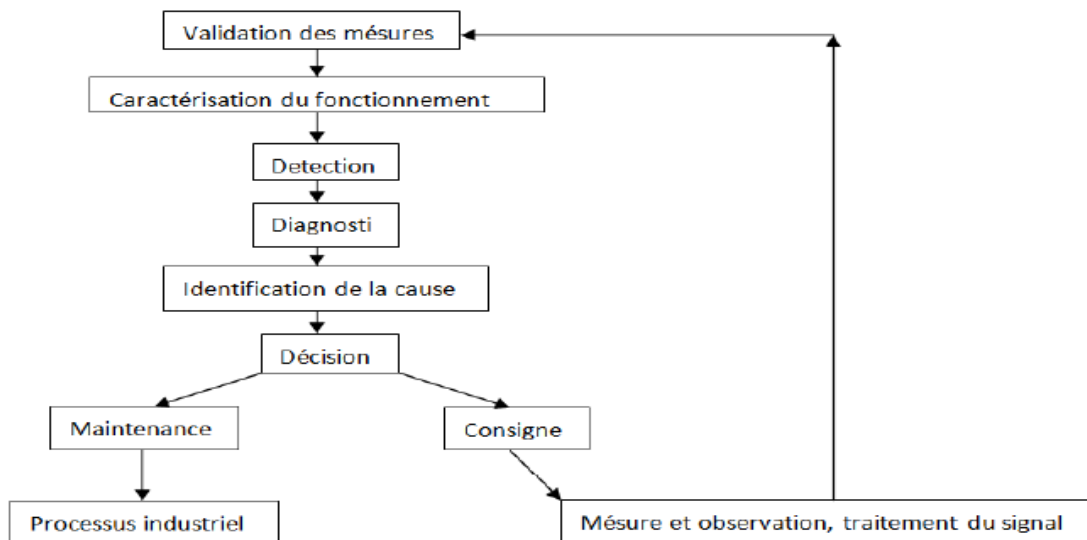


Figure 1.13. Les différentes étapes du diagnostic industriel

7 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a été destiné à la présentation de notions de base indispensables pour la suite de nos travaux. Ces notions concernent la maintenance notamment celle par analyse vibratoire. Une attention particulière a été réservée aux roulements, objet de notre travail. Les principaux aspects de détérioration des roulements ont été présentés. Du point de vue diagnostic, les principales méthodes de traitement de signal utilisées pour la détection des défauts de roulements ont également été présentées.

Chapitre II : Détection des défauts de roulements en régime constant

Ce chapitre vise la détection des défauts de roulements en régime constant par application de deux approches distinctes : l'une temporelle et l'autre fréquentielle. L'approche temporelle est basée sur l'utilisation de quatre indicateurs scalaires : le kurtosis, le facteur de crête, le RMS et la valeur crête. L'influence de plusieurs paramètres sur la sensibilité de ces indicateurs est étudiée que ce soit pour le signal original mesuré ou sur celui filtré. La deuxième approche est fréquentielle, elle est basée sur l'utilisation du spectre d'enveloppe. Notons que dans ce chapitre les deux approches sont appliquées sur des signaux réels obtenus à partir de la base de données Américaine « Bearing Data Center.

1 Présentation de banc d'essais

1.1 Aperçu sur « Bearing Data Center »

C'est une base de données Américaine permettant d'accéder à des signaux de roulements sains et endommagés sous différentes configurations (différentes tailles du défaut, différents couples, différents types de défaut, ...etc.). Comme représenté sur la figure (2.1), le banc d'essai se compose principalement d'un moteur (à gauche), d'un accouplement « transducteur/encodeur » (au centre), d'un dynamomètre (à droite) et des circuits de commande (non montrés). Les signaux ont été enregistrés à l'aide d'accéléromètres fixés à la cage du moteur par aimant. Les paramètres de mesure sont les suivants :

- ✚ Les couples résistant sont respectivement 0, 1, 2, 3 HP ce qui donne des vitesses respectives de 1797, 1772, 1750, 1730 tr/min ;
- ✚ La fréquence d'échantillonnage est $F_e = 48$ KHz ;
- ✚ La taille des défauts de roulements sont : 0.007 inch, 0.014 inch, 0.021 inch ;

✚ les roulements que nous avons considérés dans notre travail sont les roulements du côté accouplement. Les fréquences caractéristiques sont :

- Fréquence de la bague intérieure : $F_{bi} = 5,4152 \times F_r$.
- Fréquence de la bague extérieure : $F_{be} = 3,5848 \times F_r$.
- Fréquence de la bille : $F_b = 4,7135 \times F_r$.
- Fréquence de la cage : $F_c = 0,3982 \times F_r$.

	29,95 Hz (0 Hp)	29,53 Hz (1 Hp)	29,16 Hz (2 HP)	28,83 Hz (3 Hp)
Bague intérieure	162,18 Hz	159,91 Hz	157,90 Hz	156,12 Hz
Bague extérieure	107,36 Hz	105,85 Hz	104,53 Hz	103,34 Hz
La bille	141,16 Hz	139,18 Hz	137,44 Hz	135,89 Hz
La cage	11,92 Hz	11,75 Hz	11,61 Hz	11,48 Hz

Tableau 2.1. Fréquences caractéristiques des défauts de roulement pour différents couples résistants

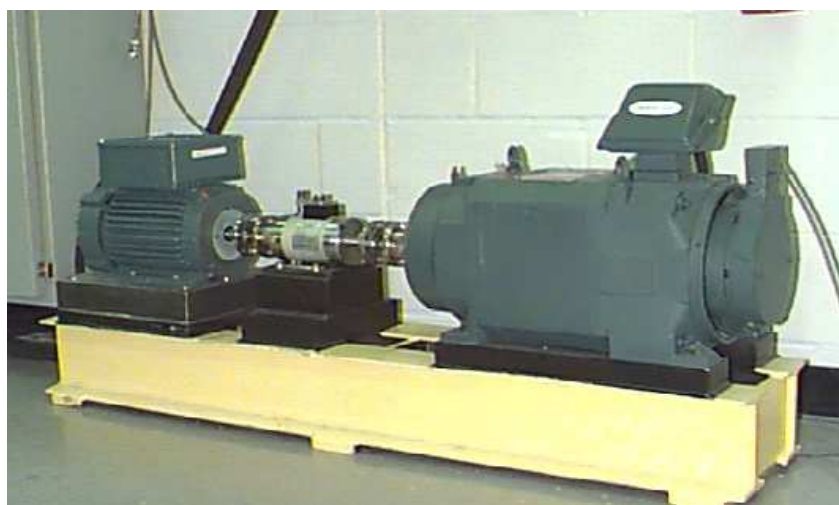


Figure 2.1. Banc d'essai de roulement de « Bearing Data Center »

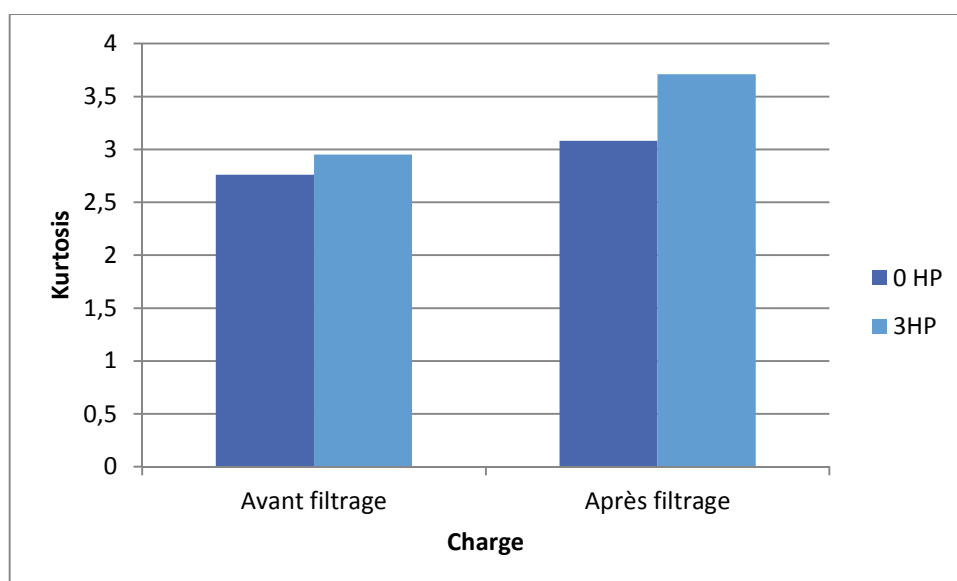
2 Application de l'approche temporelle

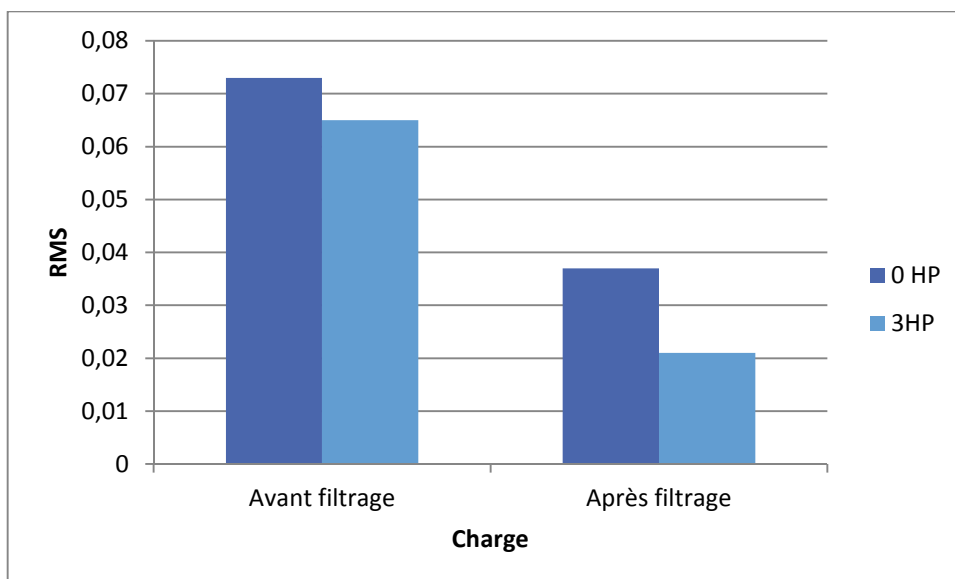
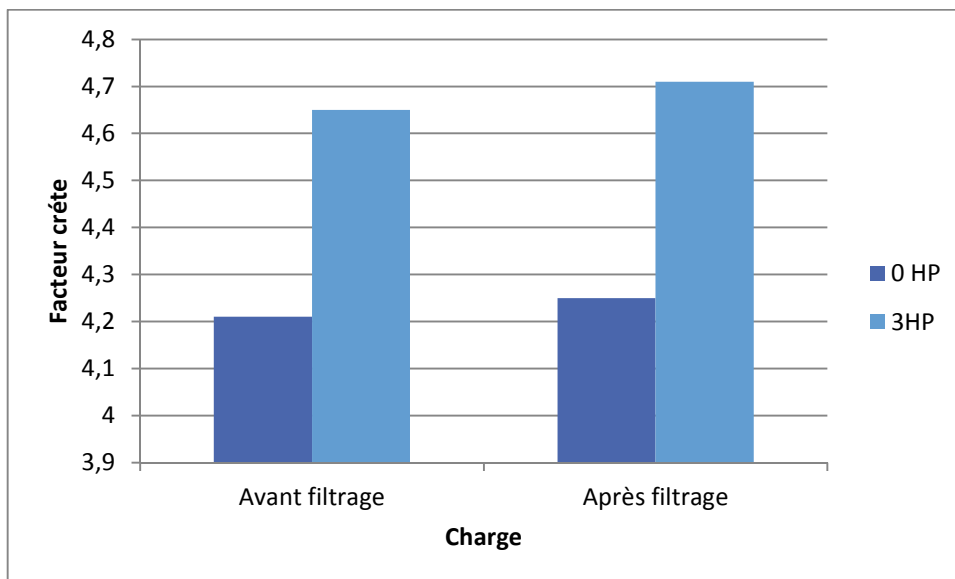
2.1 Influence de la charge

2.1.1 Cas sans défaut

Les quatre histogrammes de la figure (2.2) représentent, respectivement, le kurtosis, le facteur de crête, le RMS et la valeur crête pour le cas sans défaut avec le capteur monté côté accouplement pour deux charges différentes (0 HP et 3 Hp) et ceci pour le signal original mesuré et celui filtré. La première remarque à soulever est le fait que les valeurs du kurtosis et du facteur de crête augmentent après le filtrage, alors que celles du RMS et de la valeur crête diminuent. Ceci est tout à fait logique, car le kurtosis et le facteur de crête, étant sensibles à la forme du signal, vont augmenter, alors que les deux autres indicateurs (RMS et valeur crête) sont plutôt sensibles à l'énergie du signal et donc vont diminuer après filtrage.

La deuxième remarque importante est le fait que le kurtosis ne dépasse pas son seuil de détection (3), et le facteur de crête de crête également (6) car il s'agit du cas sans défaut. Enfin en fonction de la charge la tendance est carrément inverse ; le kurtosis et le facteur de crête augmente légèrement avec l'augmentation de la charge, alors que le RMS et la valeur crête diminuent





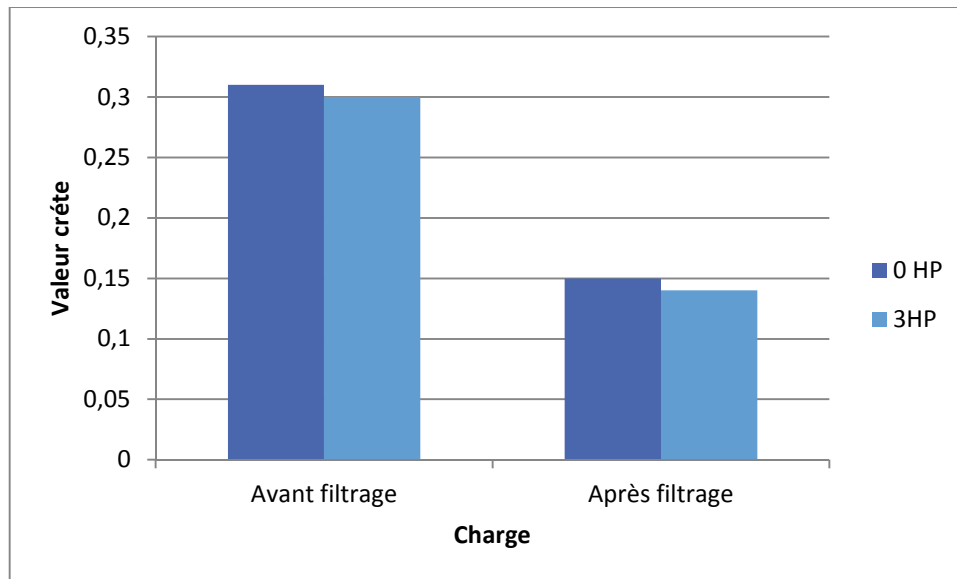
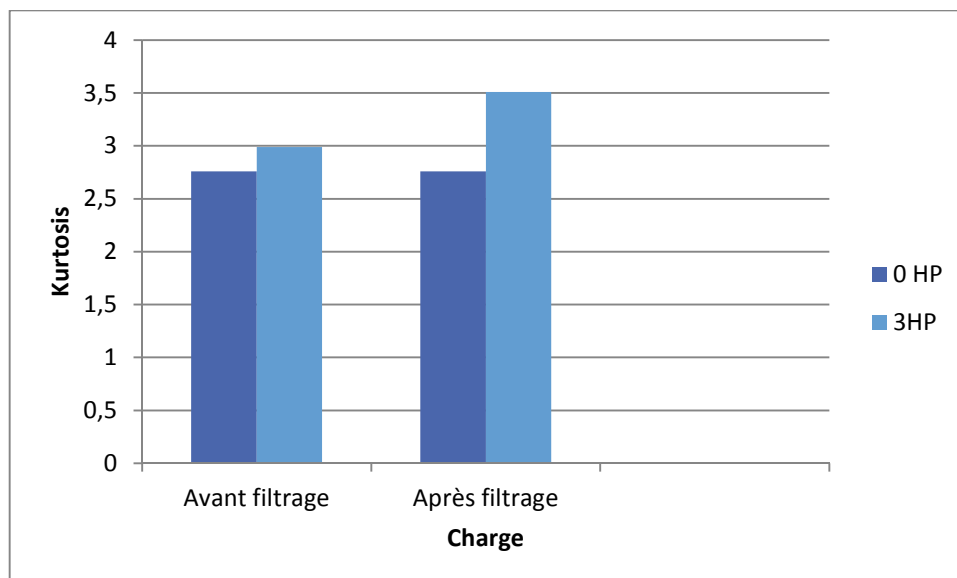
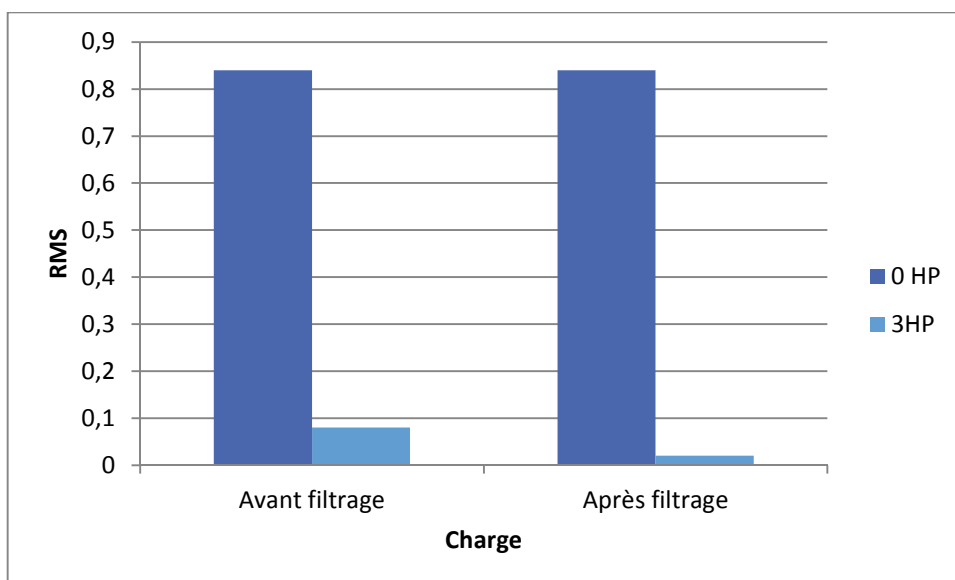
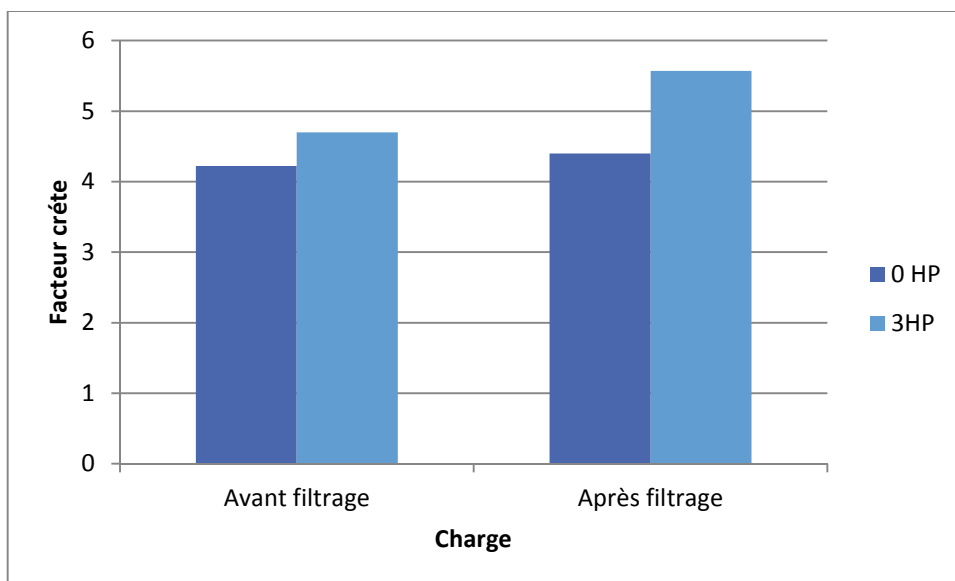


Figure 2.2. Influence de la charge pour le cas sans défaut avec le capteur monté côté accouplement

Dans le cas où le capteur est monté du côté du ventilateur, les remarques précédentes sont applicables dans ce cas. Les histogrammes de la figure (2.3) montrent les résultats obtenus.





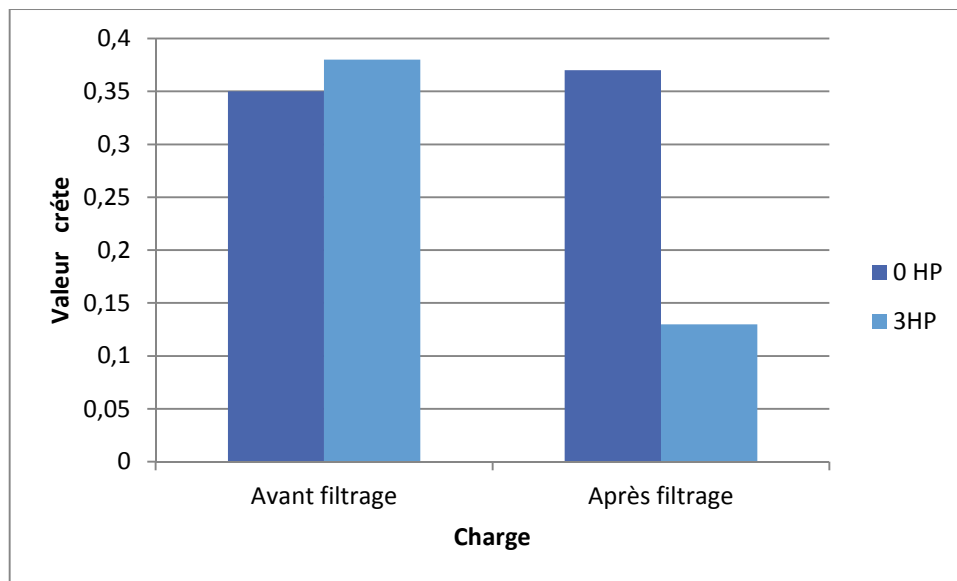
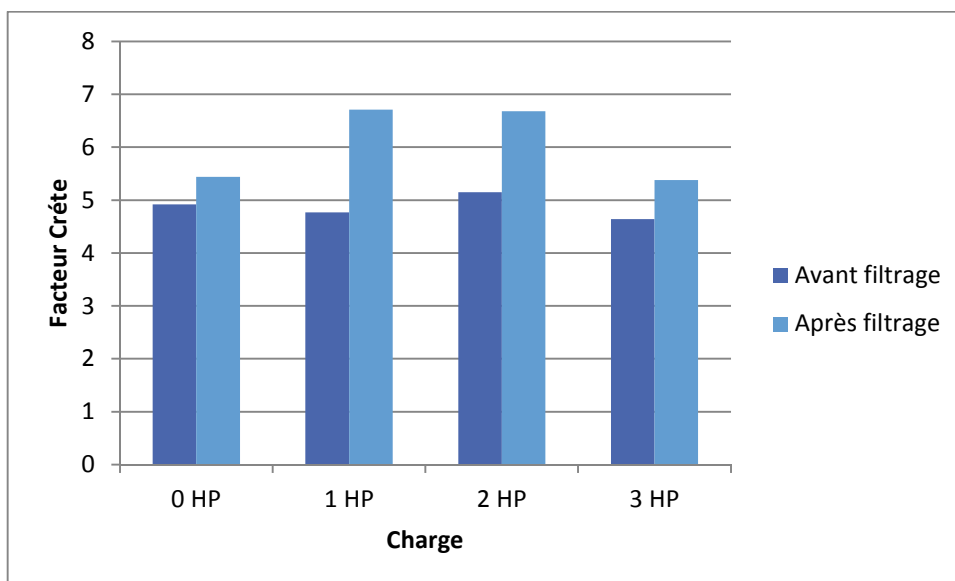
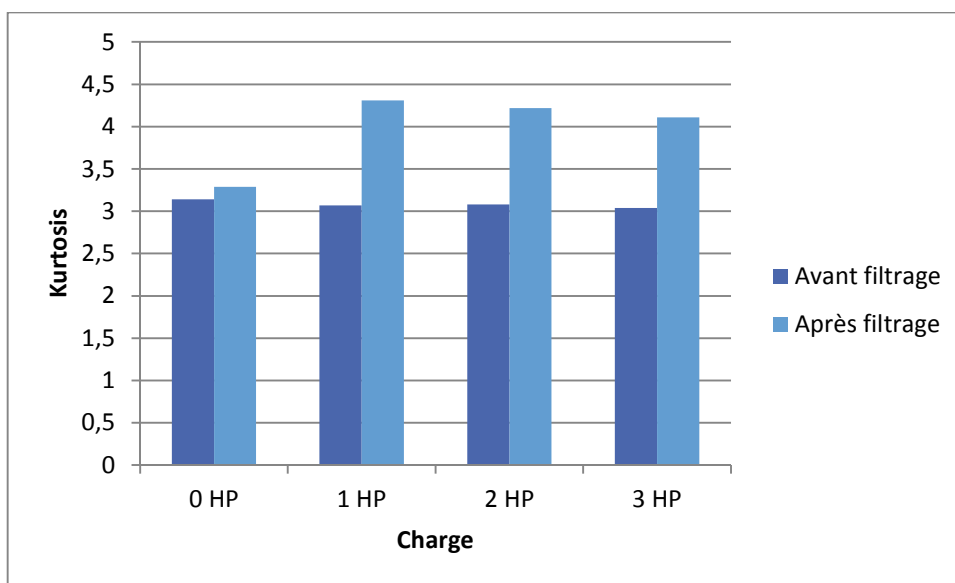


Figure 2.3. Influence de la charge pour le cas sans défaut avec le capteur monté côté ventilateur

2.1.2 Cas d'un défaut sur la bille

Les quatre histogrammes de la figure (2.4) représentent, respectivement, le kurtosis, le facteur de crête, le RMS et la valeur crête dans le cas d'un défaut sur la bille avec le capteur monté côté accouplement pour quatre charges différentes (0 HP, 1 HP, 2 HP et 3 Hp) et ceci pour le signal original mesuré et celui filtré. Le kurtosis et le facteur de crête augmentent après filtrage et affichent des valeurs dépassant dans certains cas les seuils de détection (3 pour le kurtosis et 6 pour le facteur de crête). Notons que ces deux indicateurs augmentent avec l'augmentation de la charge mais diminuent légèrement pour la plus grande charge (3 HP). Contrairement, le RMS et la valeur crête se montrent presque insensibles à la variation de la charge



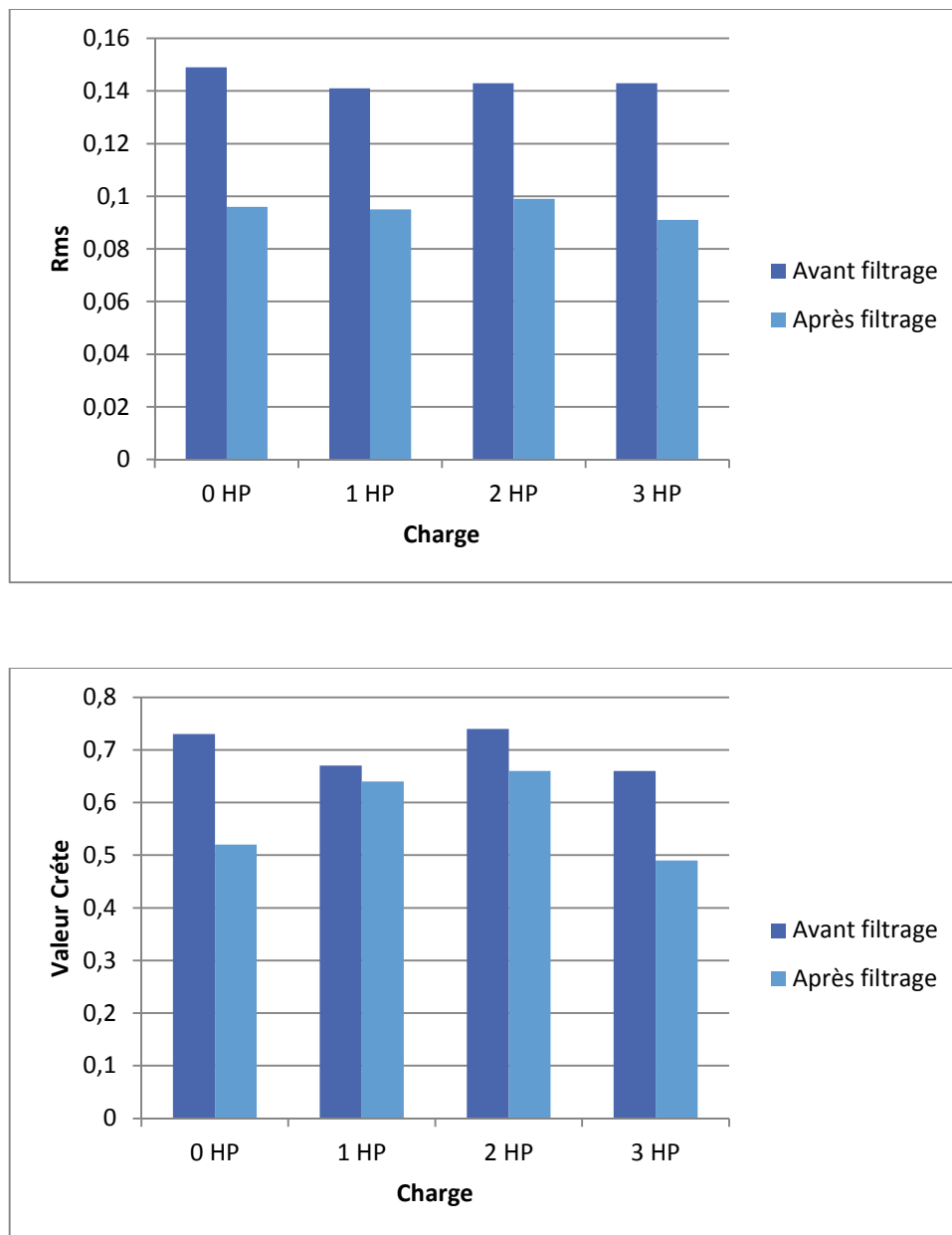
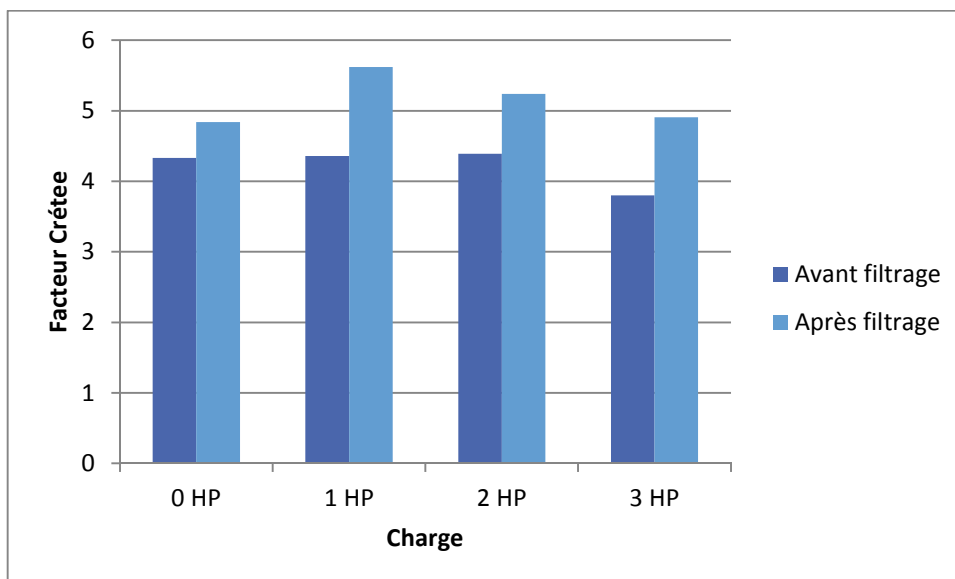
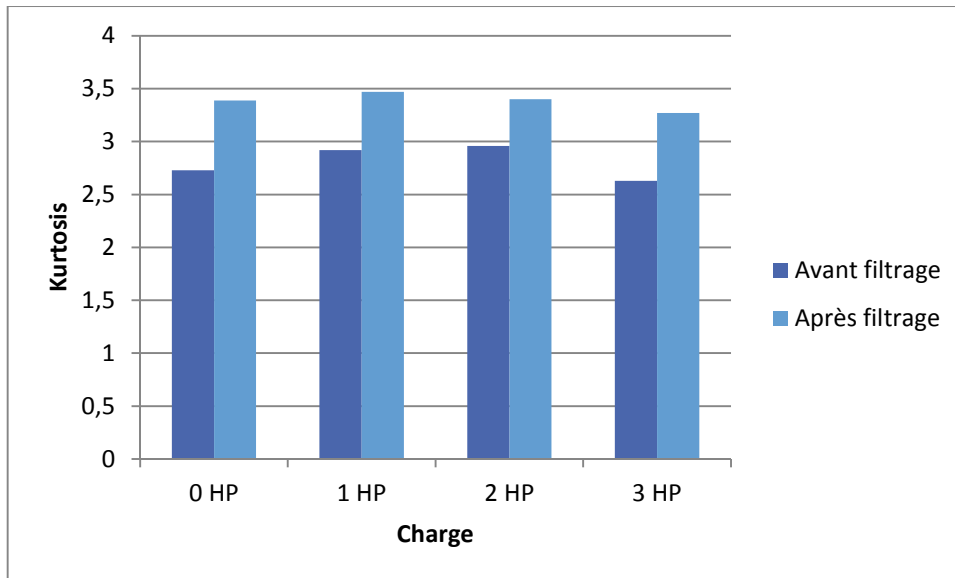


Figure 2.4. Influence de la charge pour le cas d'un défaut sur la bille avec le capteur monté côté accouplement

Dans le cas où le capteur est monté côté ventilateur (figure 2.5), on remarque que les valeurs du kurtosis et du facteur de crête sont moins importantes que dans le cas précédent. Même après filtrage, le kurtosis dépasse à peine 3 sans toutefois atteindre 3,5, alors que le facteur de crête n'atteint même pas son seuil de détection (6) et affiche des valeurs normales. A notre avis ceci est dû au fait que la mesure

Chapitre II : Détection des défauts de roulements en régime constant

est faite du côté ventilateur alors que le roulement défectueux est monté côté accouplement.



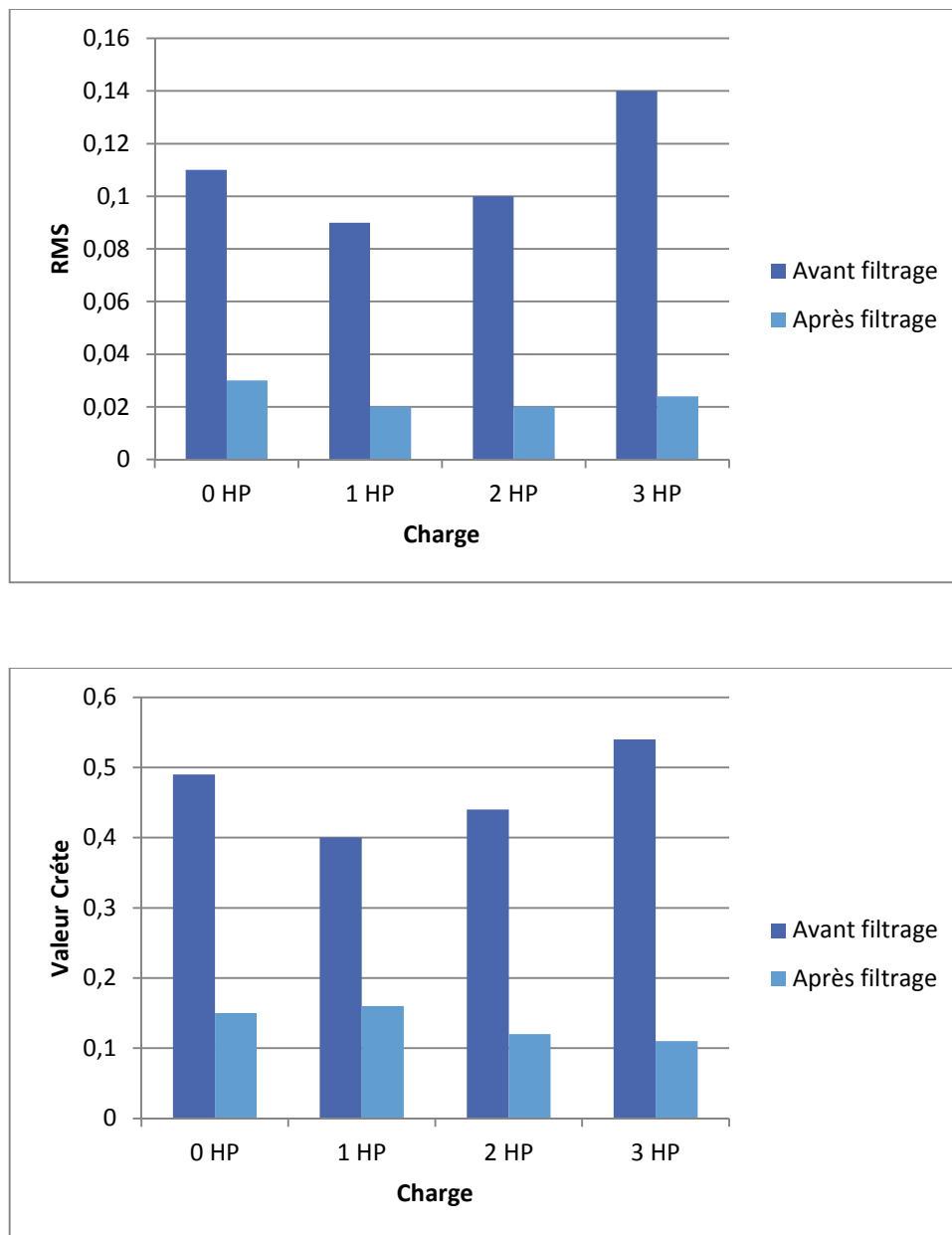


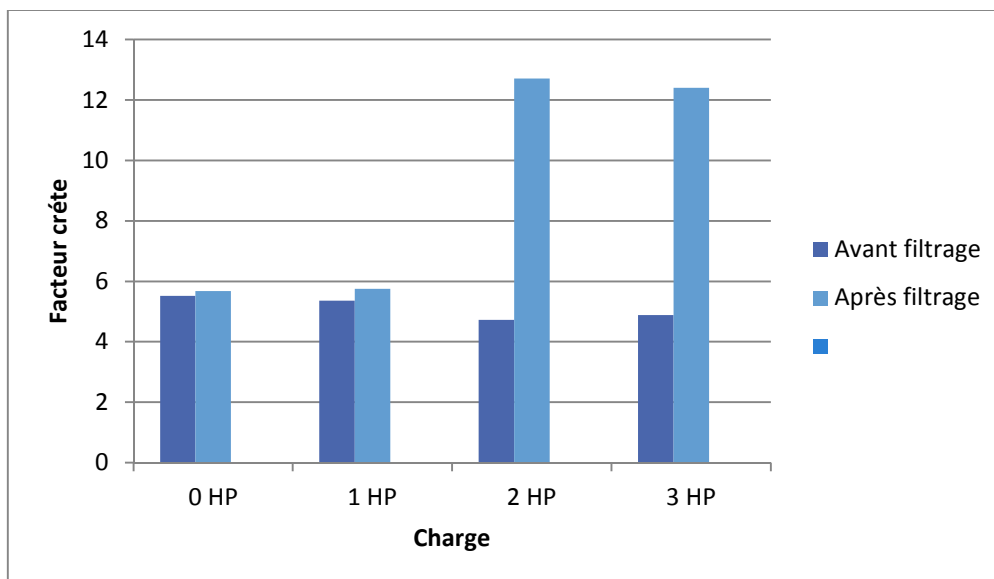
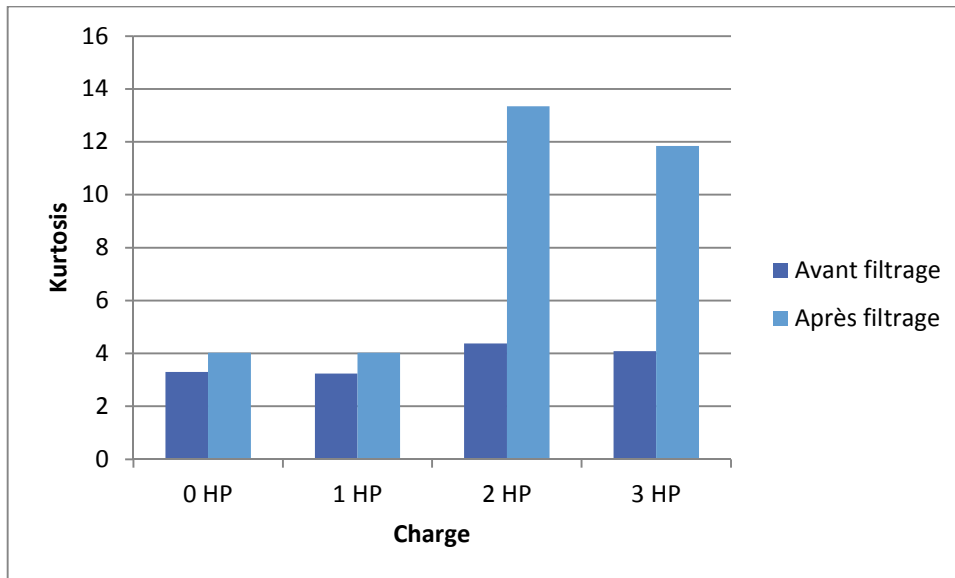
Figure 2.5. Influence de la charge pour le cas d'un défaut sur la bille avec le capteur monté côté ventilateur

2.1.3 Cas d'un défaut sur bague extérieure

Les quatre histogrammes de la figure (2.6) représentent, respectivement, le kurtosis, le facteur de crête, le RMS et la valeur crête dans le cas d'un défaut sur la bague extérieure avec le capteur monté côté accouplement pour quatre charges différentes (0 HP, 1 HP, 2 HP et 3 Hp) et ceci pour le signal original mesuré et celui filtré.

Chapitre II : Détection des défauts de roulements en régime constant

Dans ce cas on remarque que les valeurs des quatre indicateurs sont très importantes notamment pour les deux grandes charges (2 HP et 3 HP). Le kurtosis et le facteur de crête dépassent largement leurs seuils respectifs et affichent des valeurs très importantes signifiant un état très dégradé du roulement surtout en se référant à leurs valeurs après filtrage.



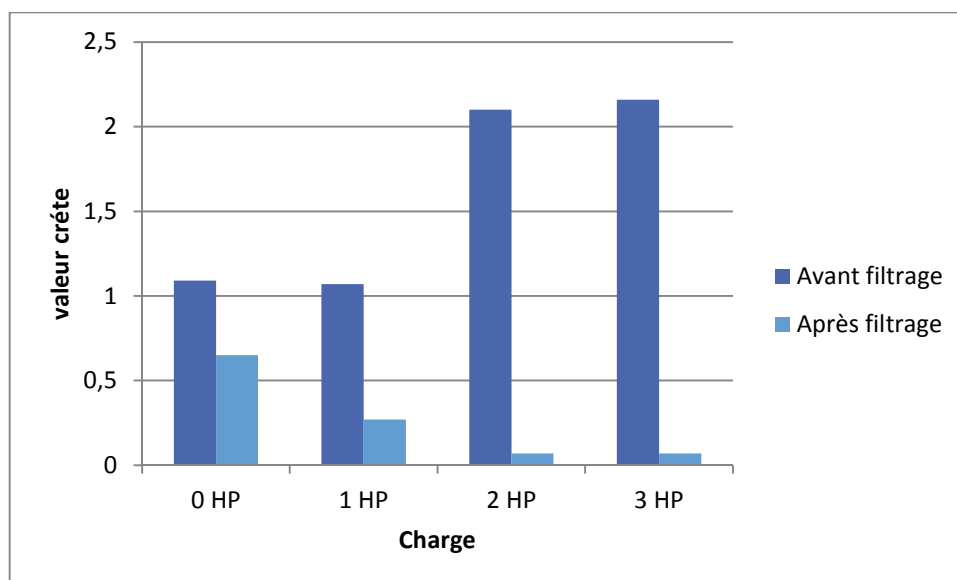
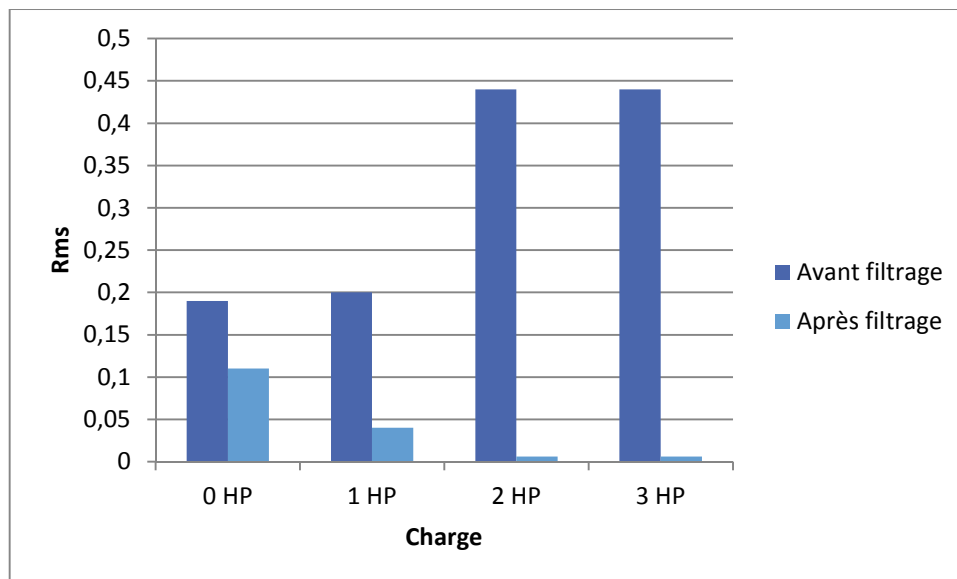
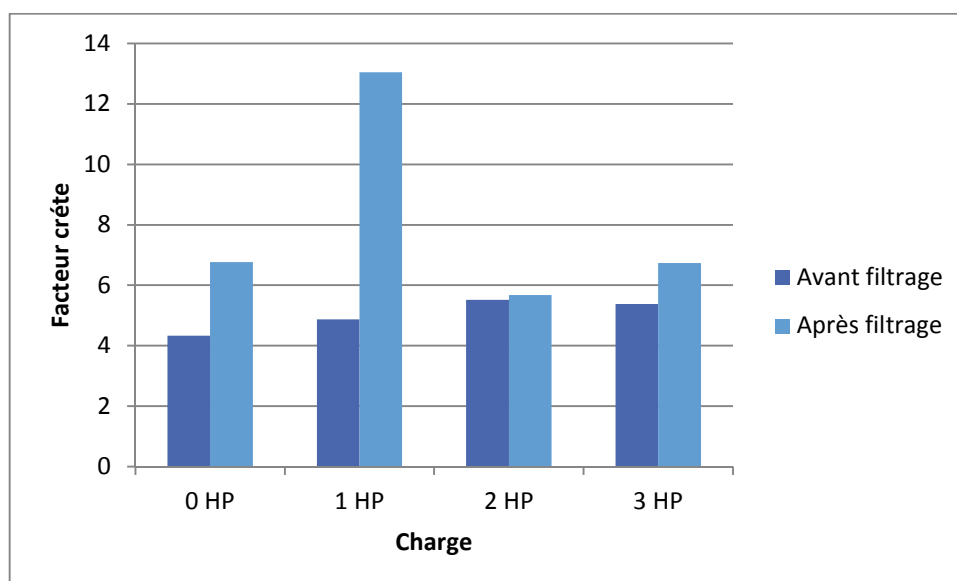
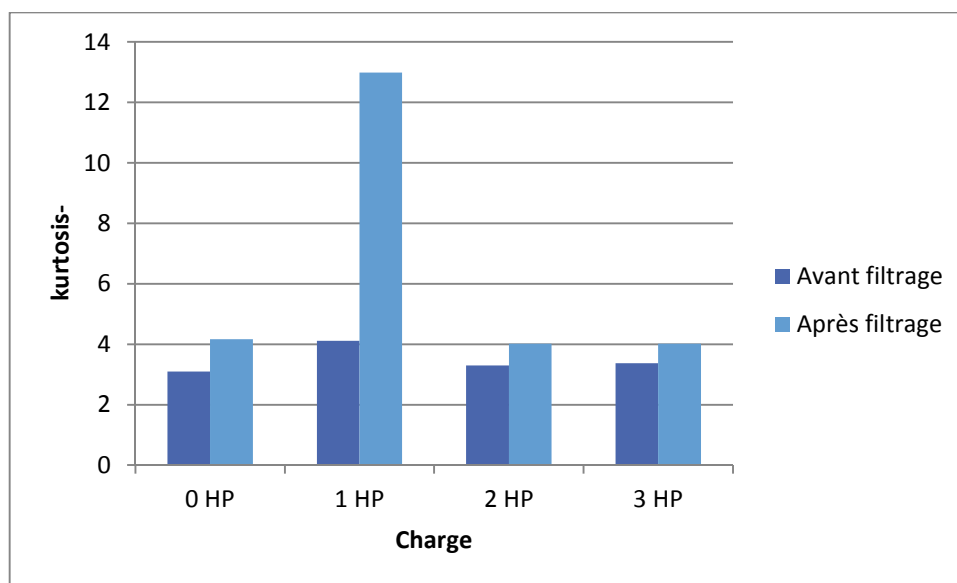


Figure 2.6. Influence de la charge pour le cas d'un défaut sur la bague extérieure avec le capteur monté côté accouplement

Dans le cas où le capteur est monté côté ventilateur (figure 2.7), les quatre indicateurs affichent des valeurs importantes pour la charge (1 HP), mais le kurtosis et le facteur de crête se montrent très sensibles au défaut et affichent des valeurs très importantes notamment après filtrage indiquant un état de dégradation très important du roulement.



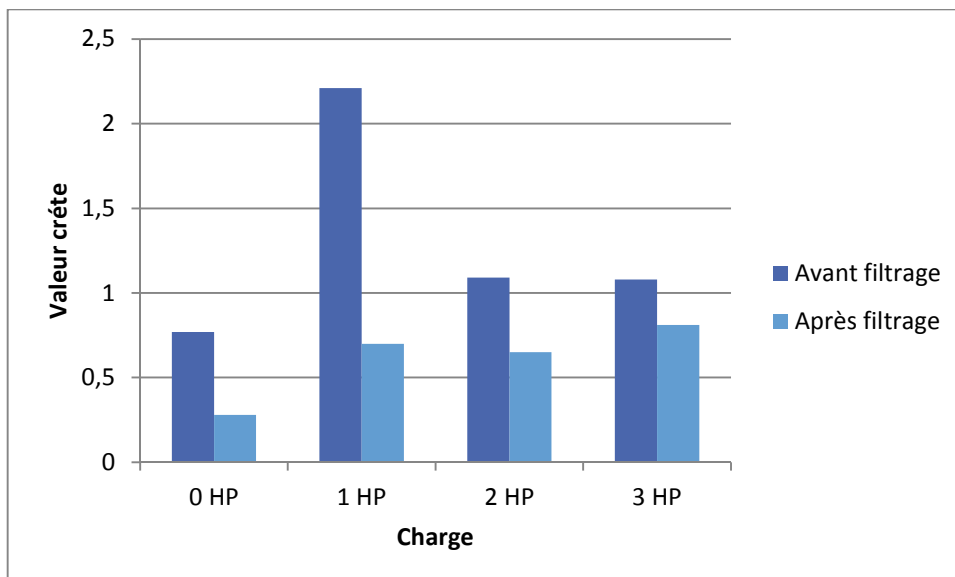
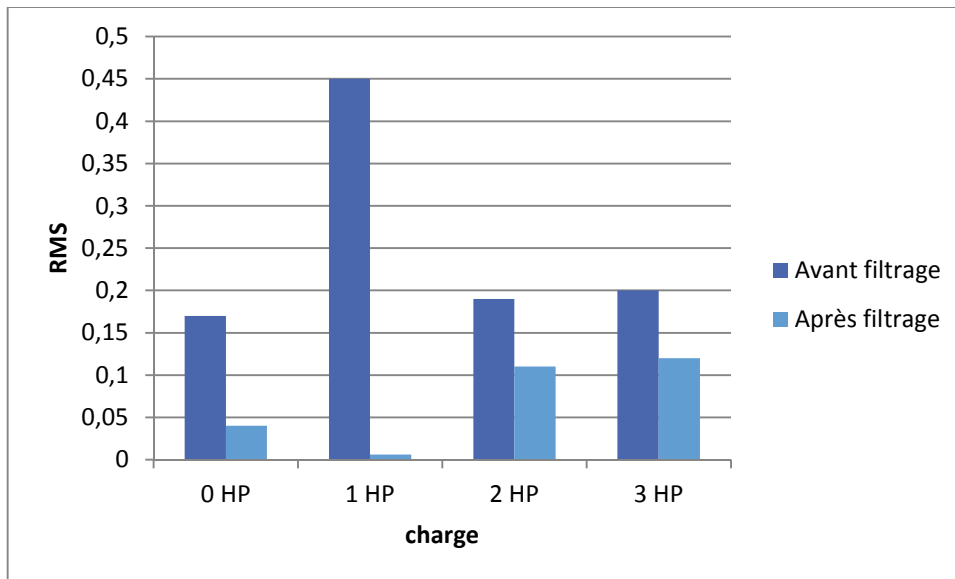


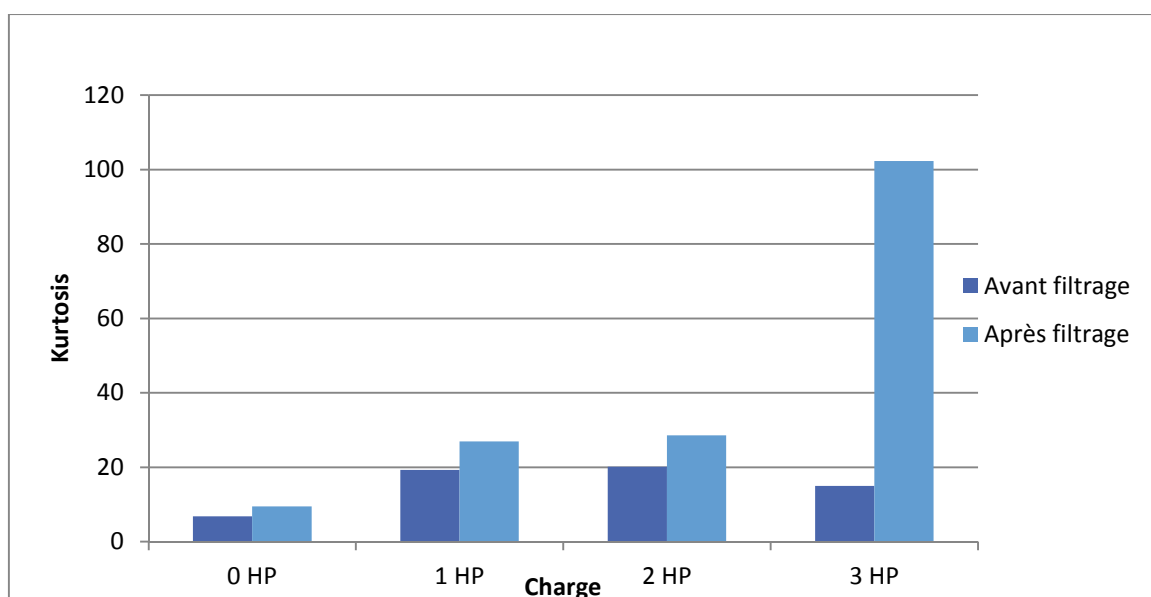
Figure 2.7. Influence de la charge pour le cas d'un défaut sur la bague extérieure avec le capteur monté côté ventilateur

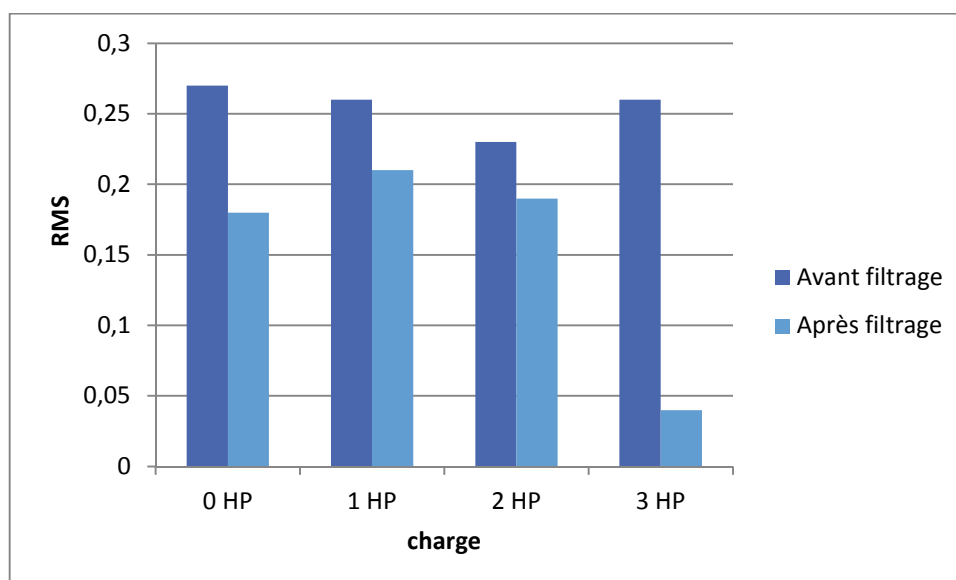
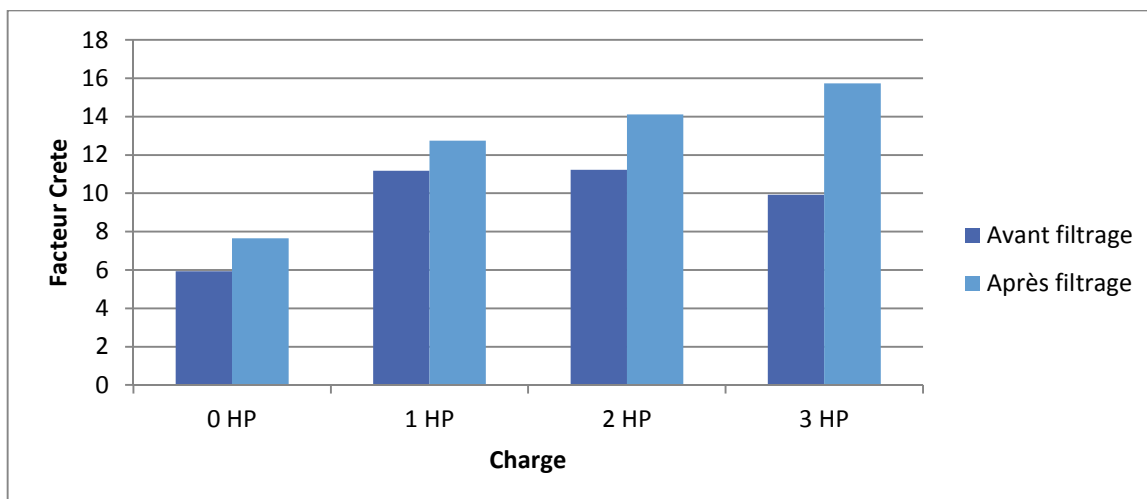
2.1.4 Cas d'un défaut sur la bague intérieure

Les quatre histogrammes de la figure (2.8) représentent, respectivement, le kurtosis, le facteur de crête, le RMS et la valeur crête dans le cas d'un défaut sur la bague intérieure avec le capteur monté côté accouplement pour quatre charges différentes (0 HP, 1 HP, 2 HP et 3 HP) et ceci pour le signal original mesuré et celui filtré.

Dans ce cas le kurtosis et le facteur de crête sont très importants pour la plus grande charge, notamment pour le kurtosis qui dépasse 100 pour le signal filtré de la charge (3 HP). Bien que le RMS semble insensible à la charge pour ce cas, la valeur crête augmente avec l'augmentation de la charge.

Les mêmes remarques sont valables pour le cas où le capteur est monté côté ventilateur (figure 2.9), sauf que dans ce cas les valeurs des quatre indicateurs, notamment celles du kurtosis et du facteur de crête, sont moins importantes pour les raisons que nous avons soulevé précédemment, mais leurs valeurs restent quand même très significatives d'un état de dégradation avancé du roulement, notamment pour les signaux filtrés.





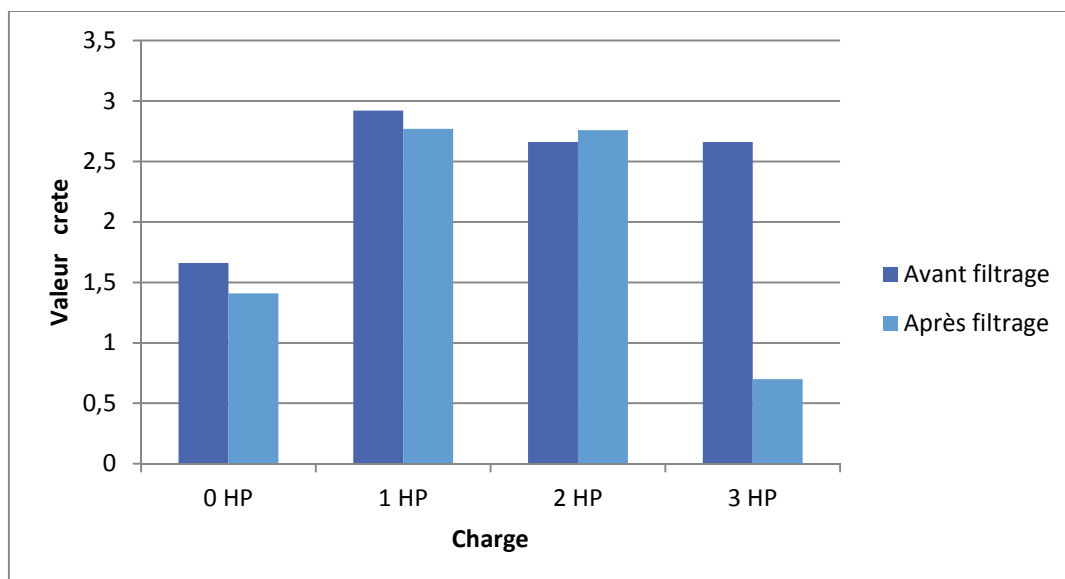
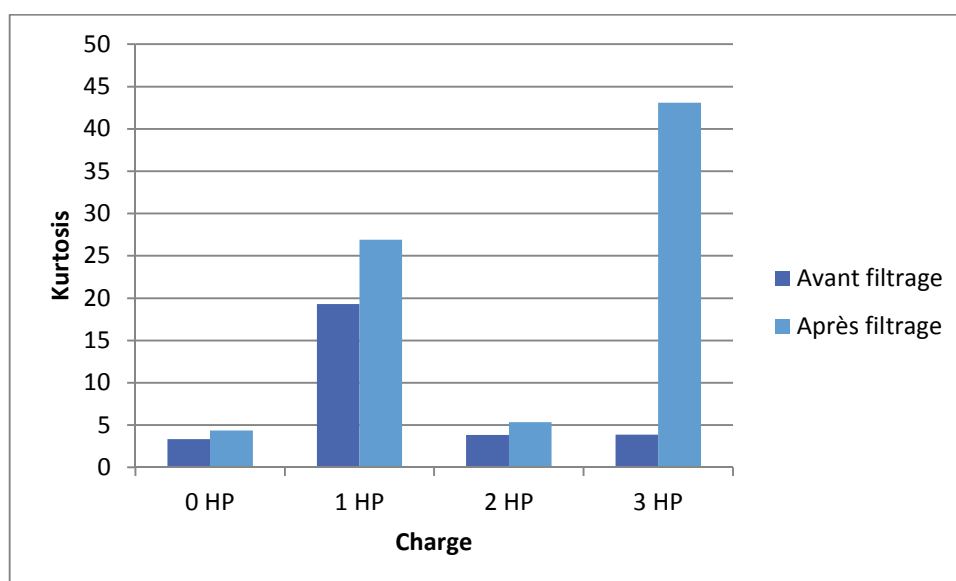
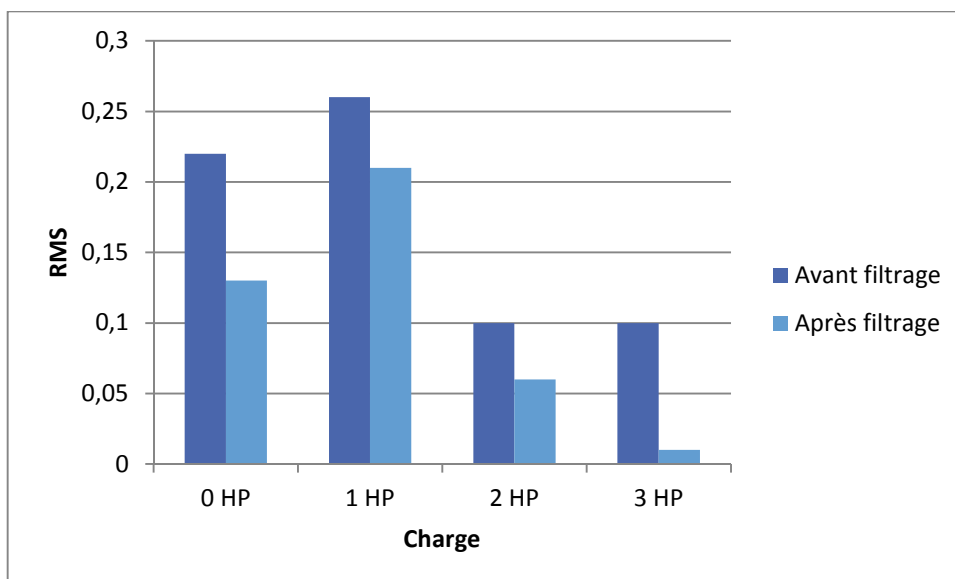
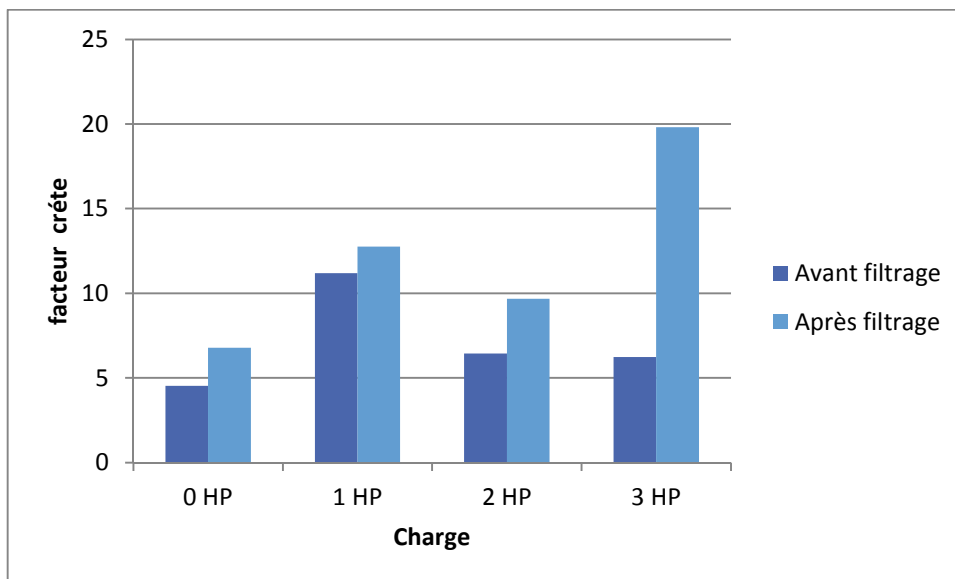


Figure 2.8. Influence de la charge pour le cas d'un défaut sur la bague intérieure avec le capteur monté côté accouplement





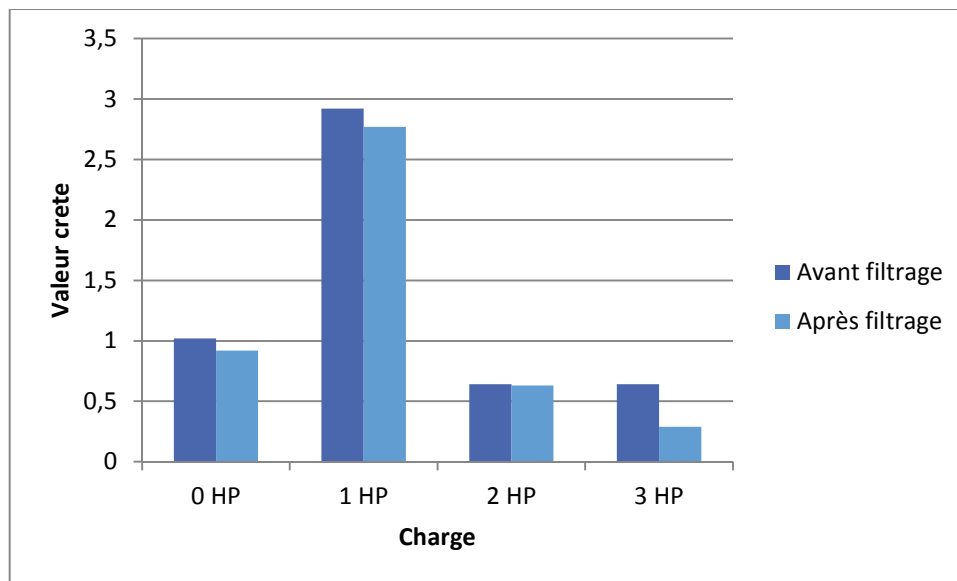


Figure 2.9. Influence de la charge pour le cas d'un défaut sur la bague intérieure avec le capteur monté côté ventilateur

2.2 Influence de la gravité de défaut

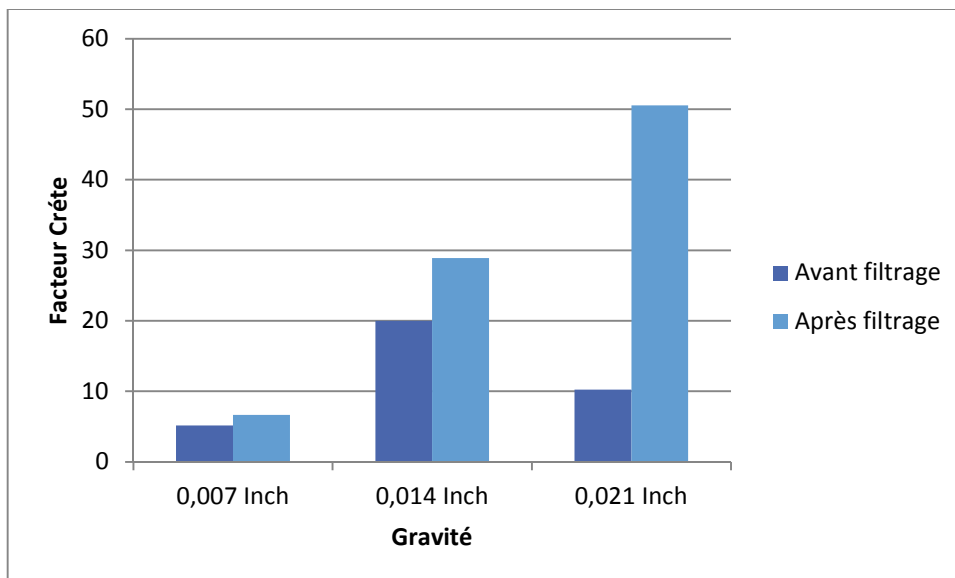
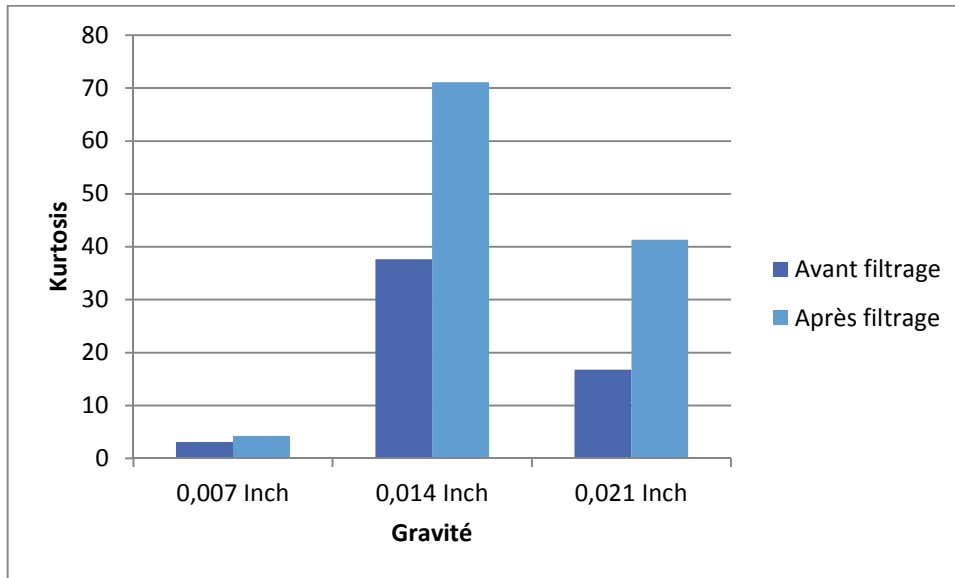
2.2.1 Cas d'un défaut sur la bille

Les quatre histogrammes de la figure (2.10) représentent, respectivement, le kurtosis, le facteur de crête, le RMS et la valeur crête dans le cas d'un défaut sur la bille avec le capteur monté côté accouplement pour trois gravités différentes (0.007 inch, 0.014 inch et 0.021 inch) et ceci pour le signal original mesuré et celui filtré.

Généralement, le facteur de crête, le RMS et la valeur crête augmentent avec l'augmentation de la charge. Le plus important c'est la tendance du kurtosis qui augmente puis chute considérablement pour la plus grande charge. Cette tendance est conforme à la littérature qui confirme que le kurtosis est un très bon indicateur qui augmente avec l'augmentation du défaut mais affiche des valeurs faibles dès que le défaut atteint une valeur excessive. Ceci constitue, à notre avis, un inconvénient majeur du kurtosis qui peut être surmonté par une surveillance permanente.

Chapitre II : Détection des défauts de roulements en régime constant

Pour le cas où le capteur est monté côté ventilateur, les quatre indicateurs affichent presque la même tendance, une augmentation puis une diminution pour la plus grande gravité (figure 2.11).



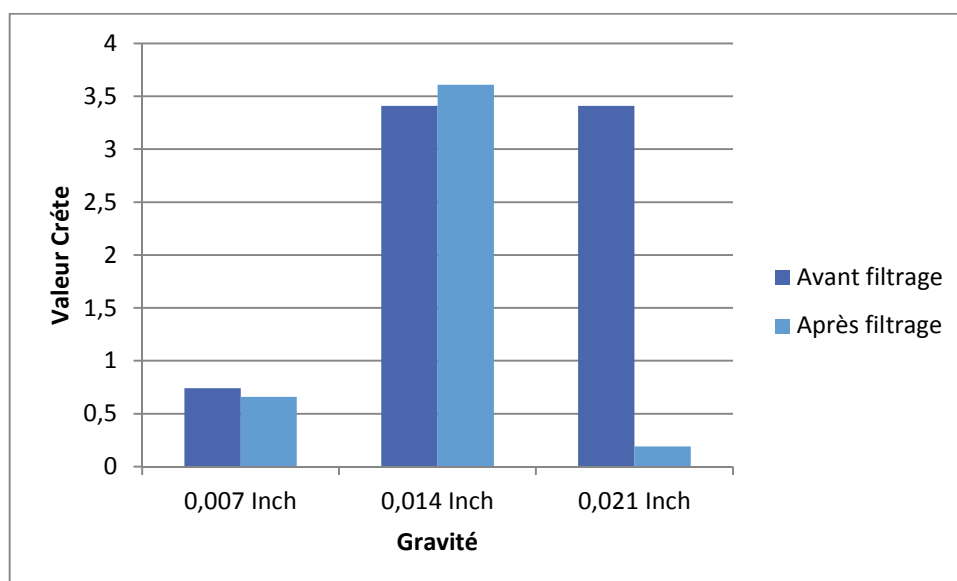
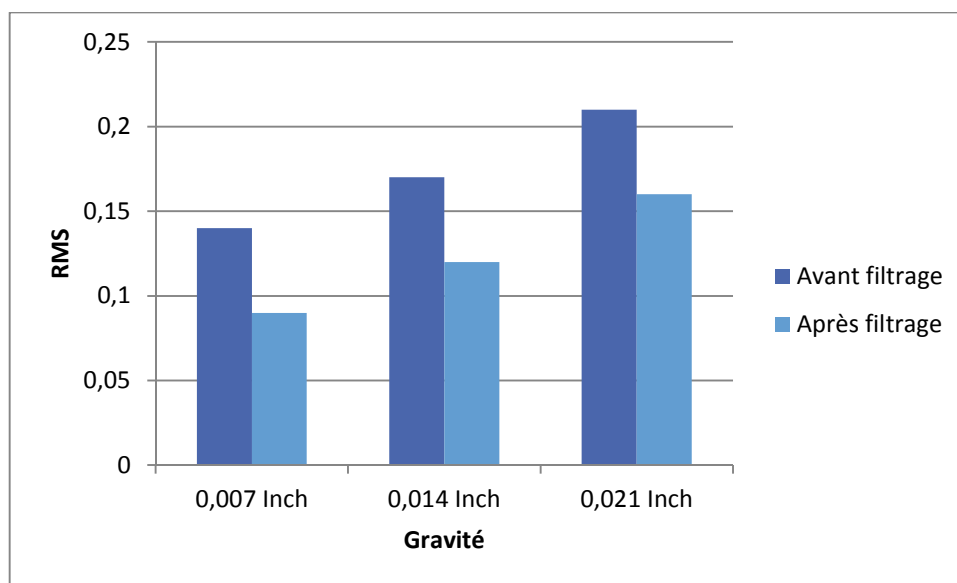
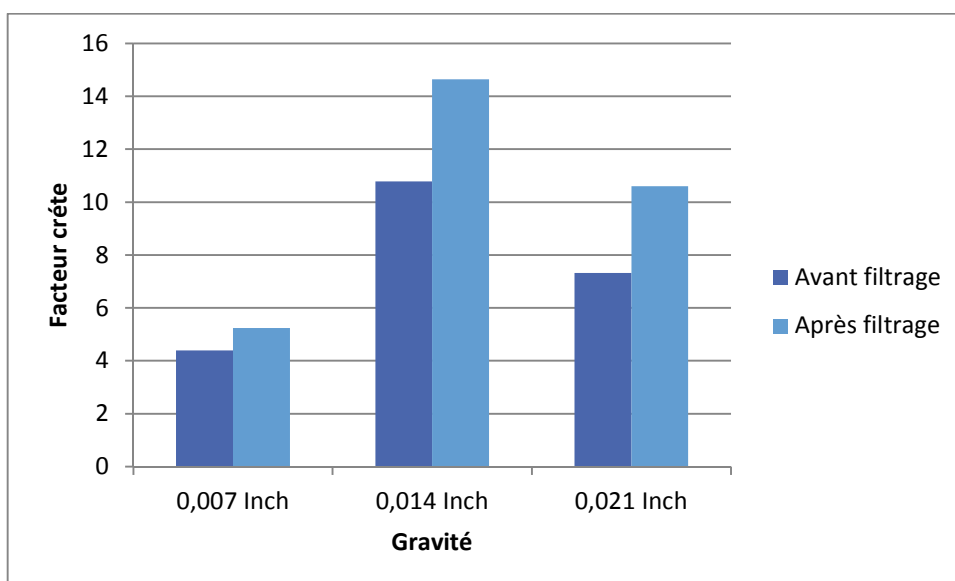
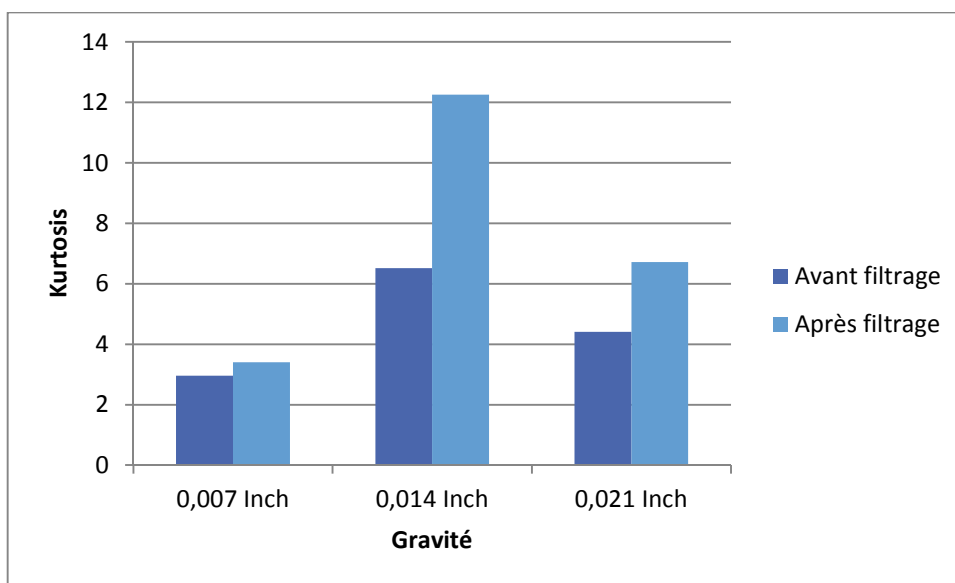


Figure 2.10. Influence de la gravité du défaut pour le cas d'un défaut sur la bille avec le capteur monté côté accouplement



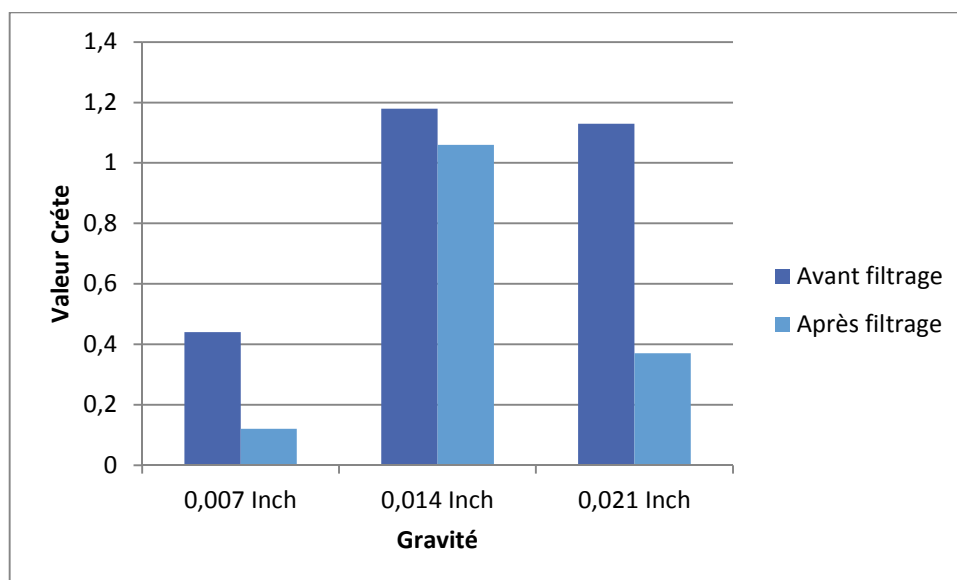
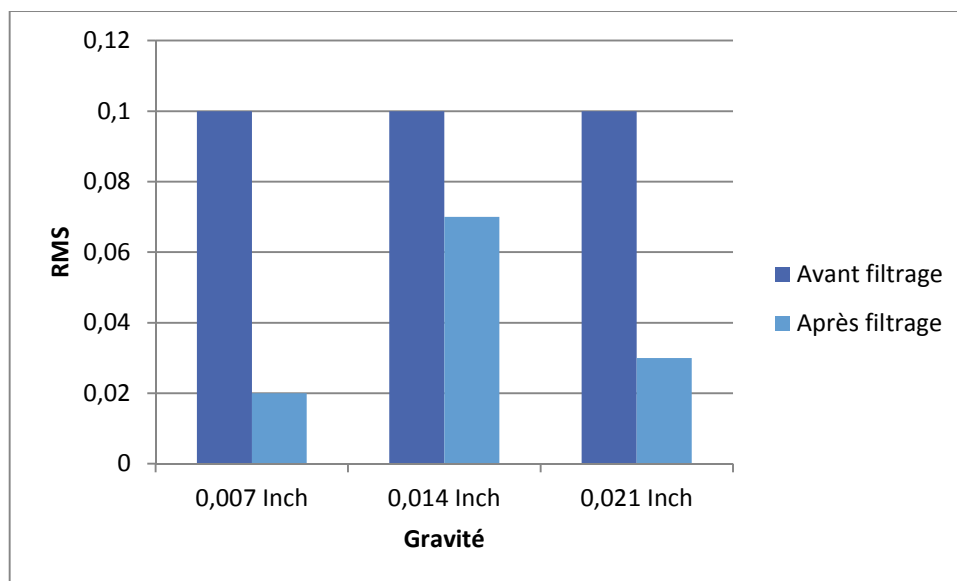
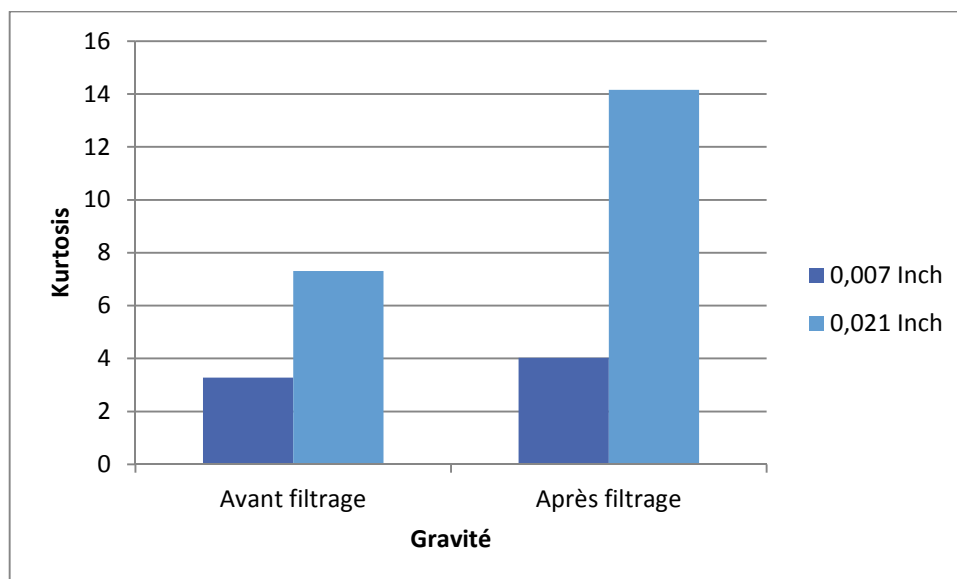


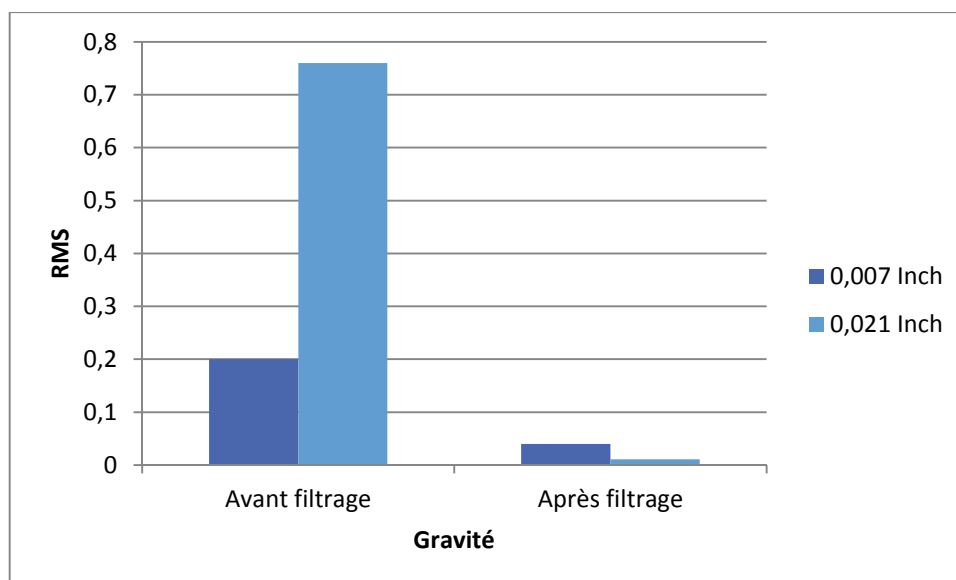
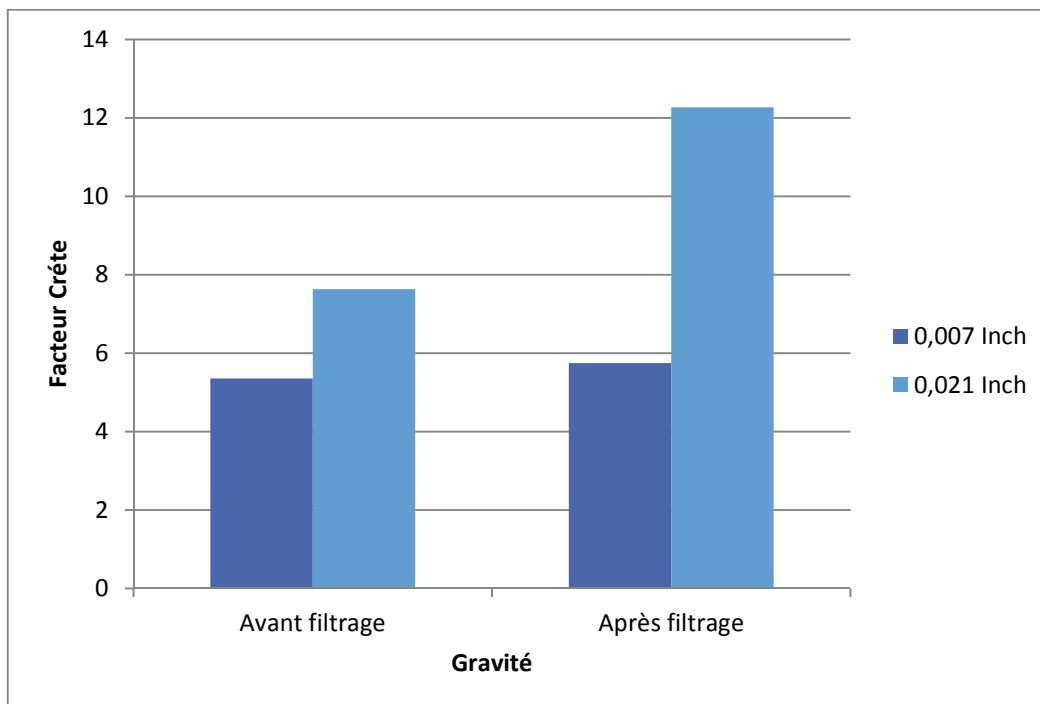
Figure 2.11. Influence de la gravité du défaut pour le cas d'un défaut sur la bille avec le capteur monté côté ventilateur

2.2.2 Cas d'un défaut sur bague extérieure

Les quatre histogrammes de la figure (2.12) représentent, respectivement, le kurtosis, le facteur de crête, le RMS et la valeur crête dans le cas d'un défaut sur la bague extérieure avec le capteur monté côté accouplement pour deux gravités différentes (0.007 inch et 0.021 inch) et ceci pour le signal original mesuré et celui filtré.

Dans ce cas les quatre indicateurs augmentent considérablement avec l'augmentation de la gravité notamment pour le signal filtré. Alors que la tendance est tout à fait contraire dans le cas où le roulement est monté côté ventilateur (figure 2.13).





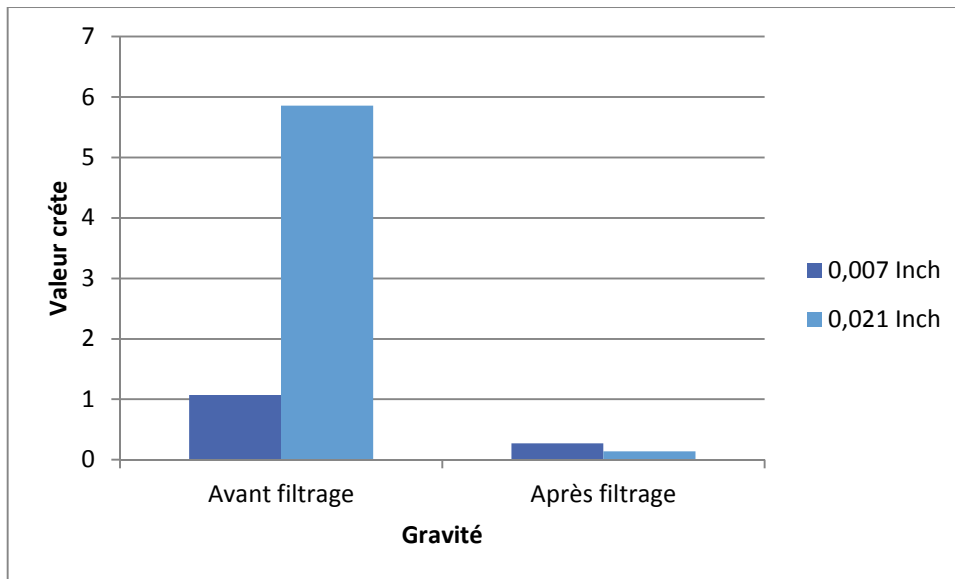
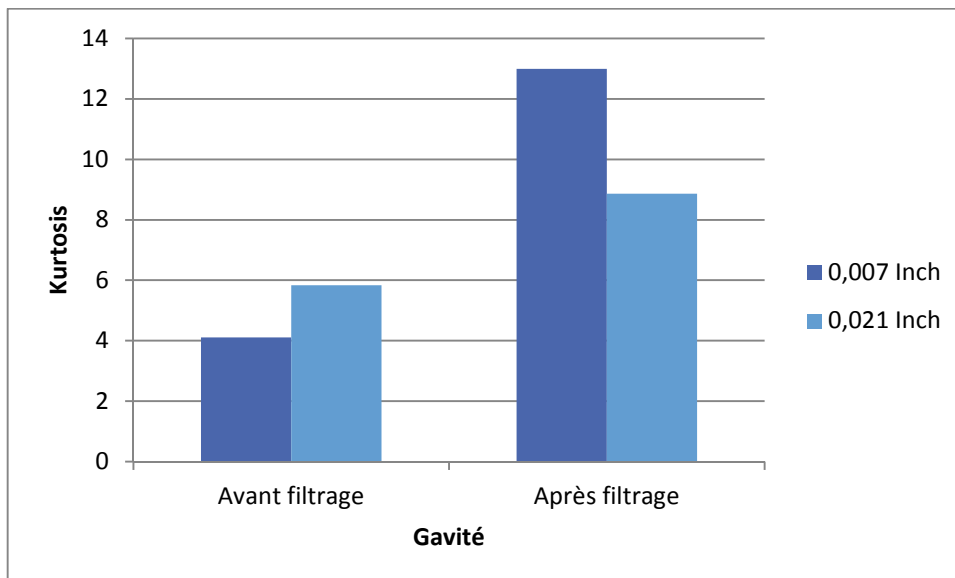
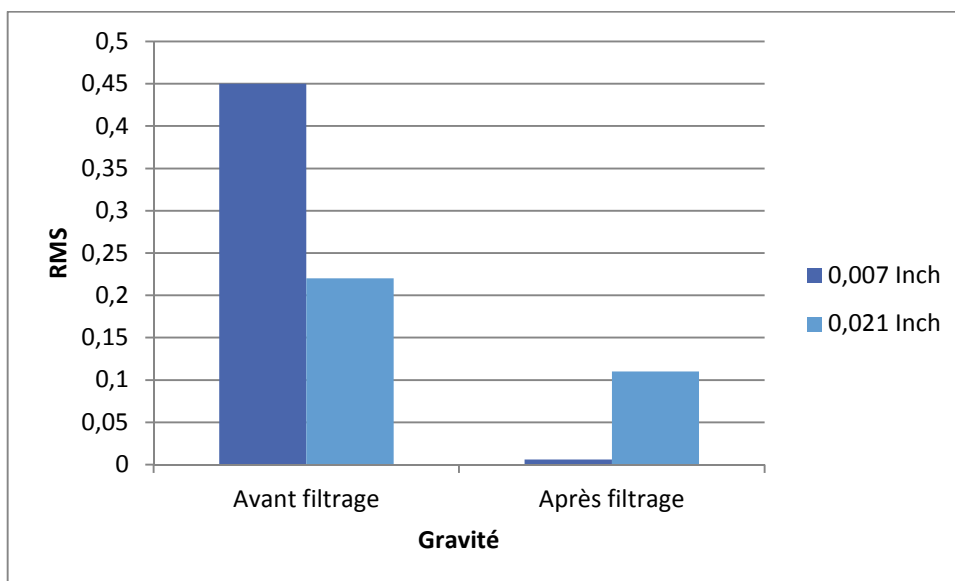
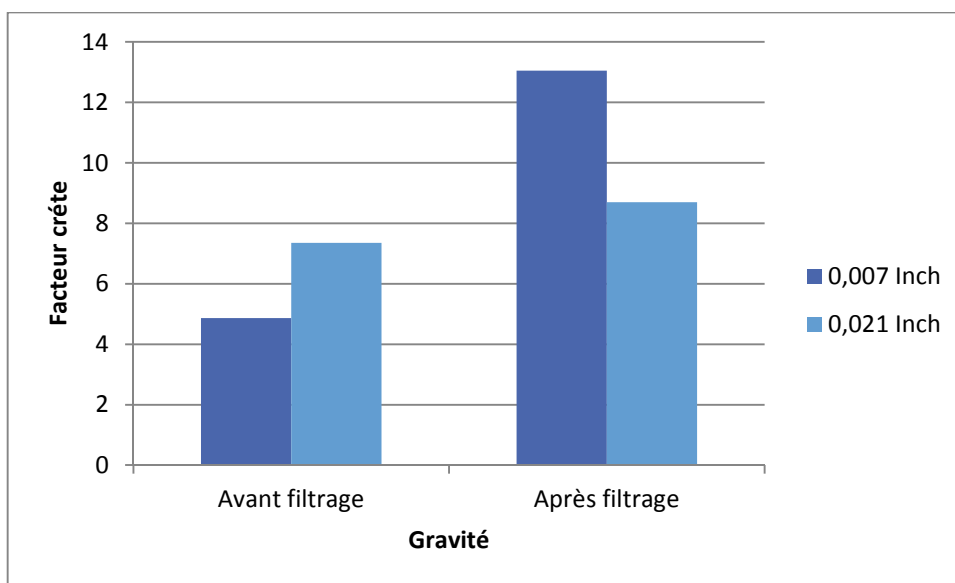


Figure 2.12. Influence de la gravité du défaut pour le cas d'un défaut sur la bague extérieure avec le capteur monté côté accouplement





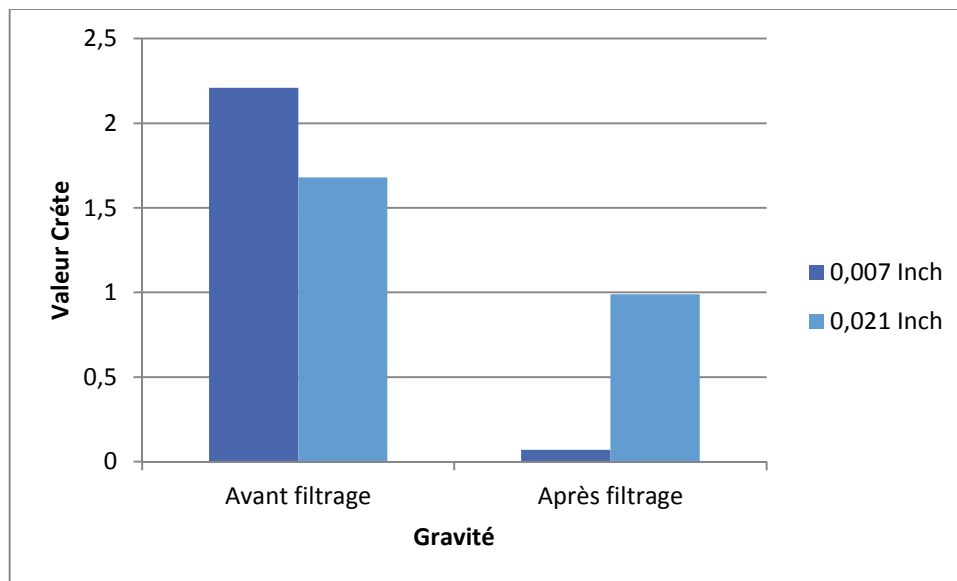
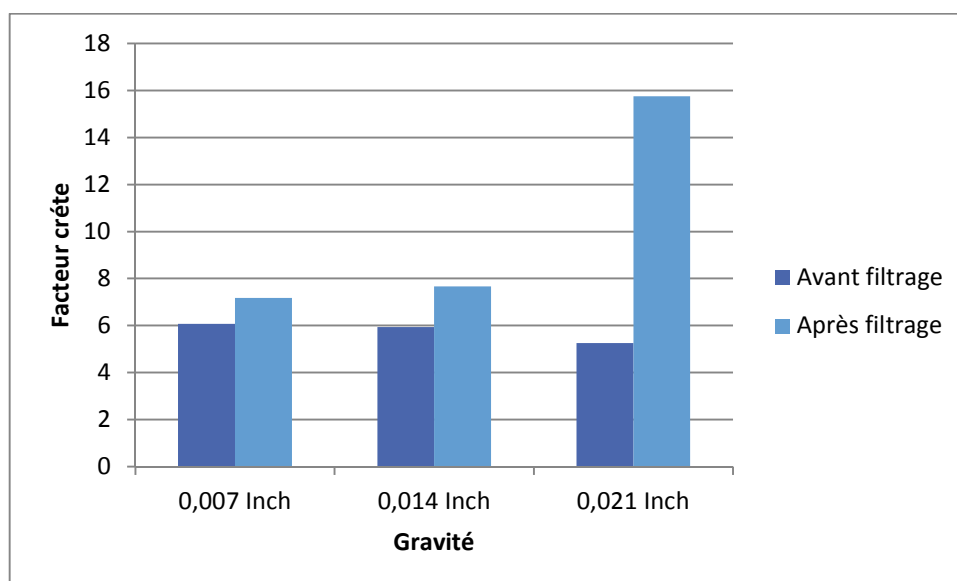
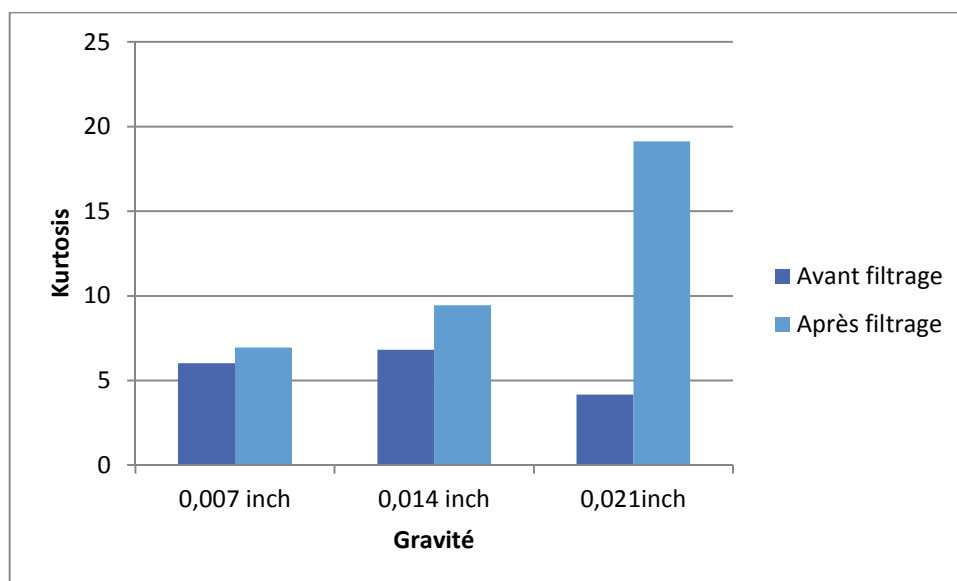


Figure 2.13. Influence de la gravité du défaut pour le cas d'un défaut sur la bague extérieure avec le capteur monté côté ventilateur

2.2.3 Cas d'un défaut sur bague intérieure

Les quatre histogrammes de la figure (2.14) représentent, respectivement, le kurtosis, le facteur de crête, le RMS et la valeur crête dans le cas d'un défaut sur la bague intérieure avec le capteur monté côté accouplement pour trois gravités différentes (0.007 inch, 0.014 inch et 0.021 inch) et ceci pour le signal original mesuré et celui filtré.

Le kurtosis et le facteur de crête augmentent avec l'augmentation de la gravité notamment pour les signaux filtrés, alors que le RMS et la valeur crête affichent une tendance presque parabolique. Cette remarque est aussi valable pour le cas où le capteur est monté côté ventilateur (figure 2.15).



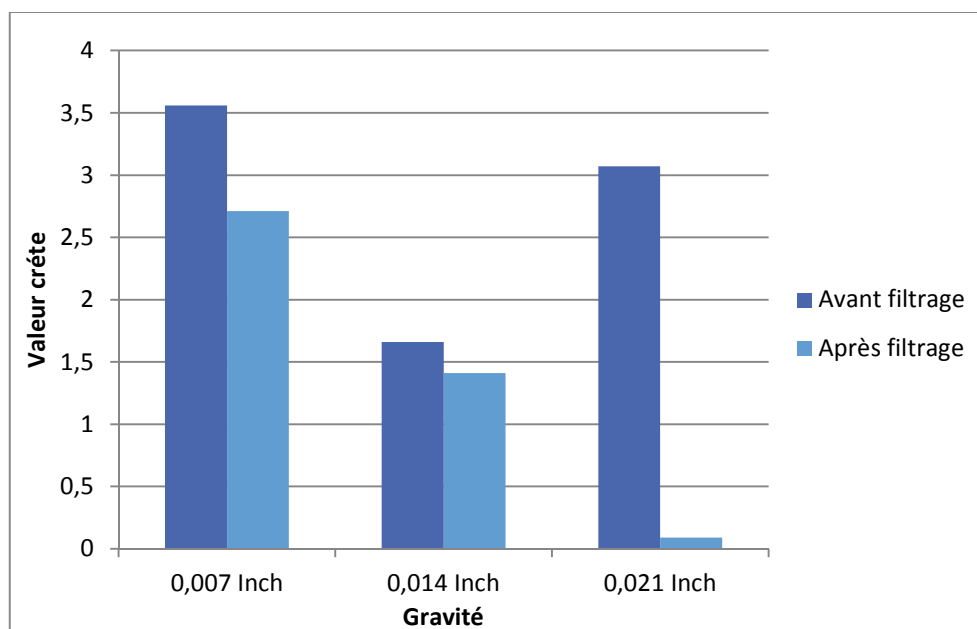
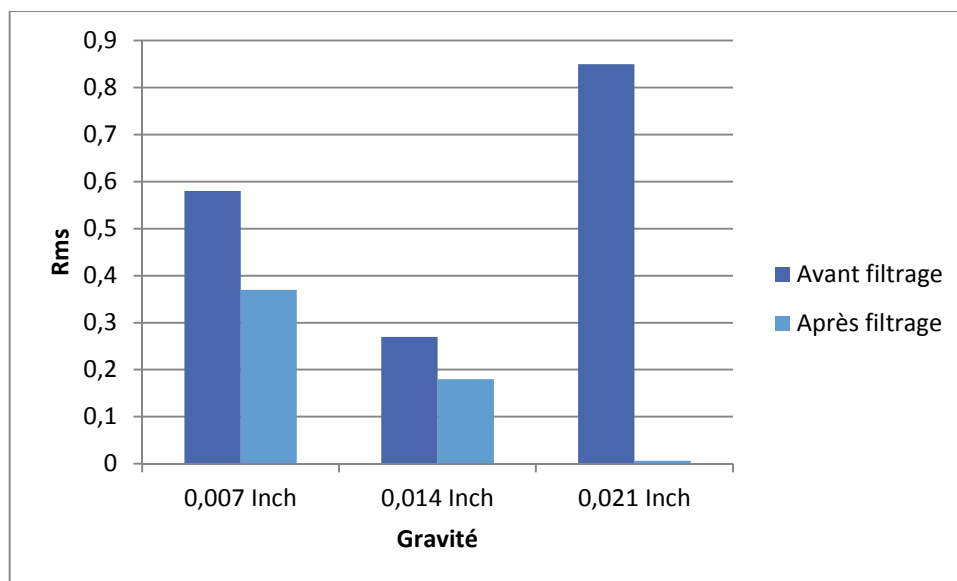
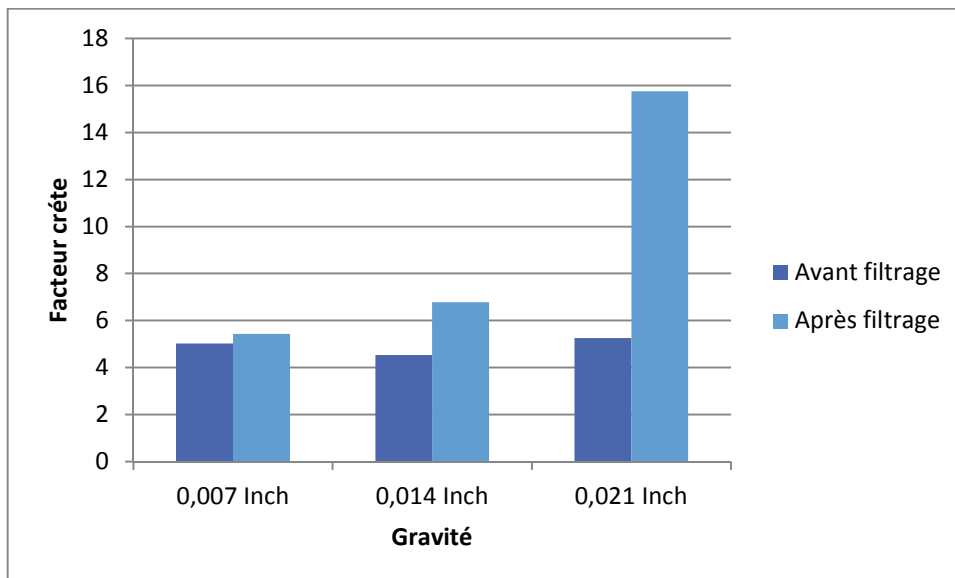
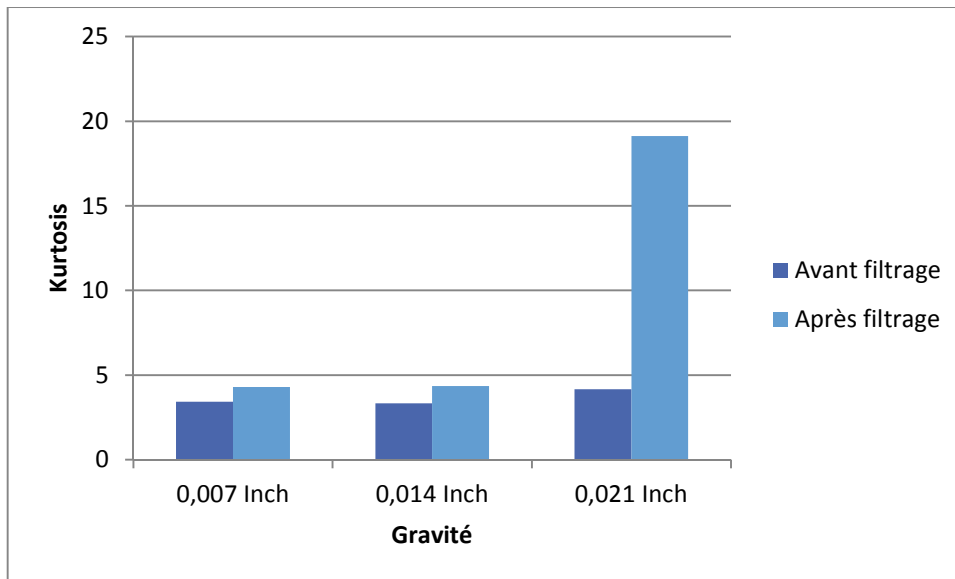


Figure 2.14. Influence de la gravité du défaut pour le cas d'un défaut sur la bague intérieure avec le capteur monté côté accouplement



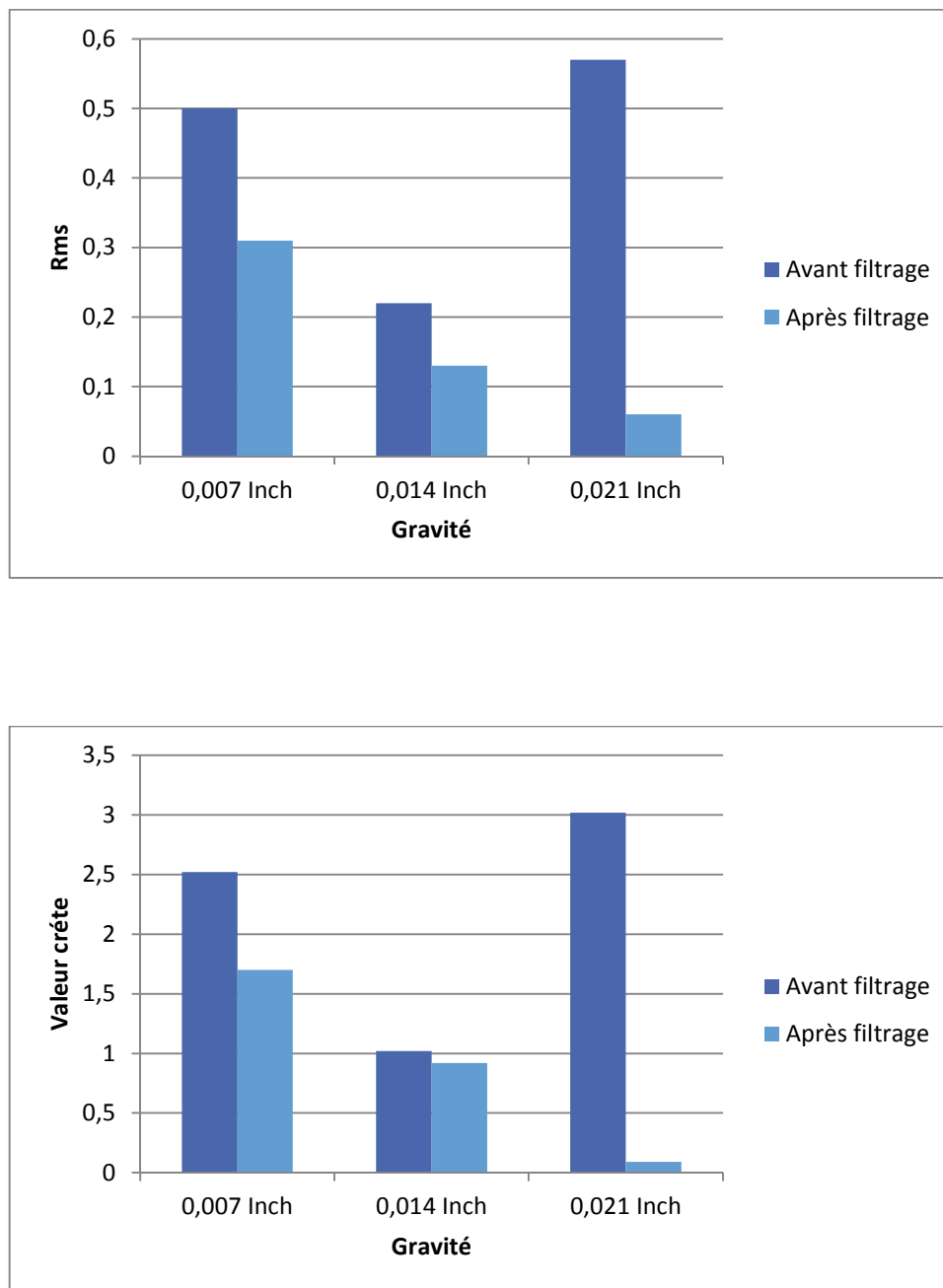


Figure 2.15. Influence de la gravité du défaut pour le cas d'un défaut sur la bague intérieure avec le capteur monté côté ventilateur

3 Application de l'approche fréquentielle

L'approche fréquentielle appliquée est basée sur le spectre d'enveloppe, pour cela le signal mesuré est filtré, puis la transformée de Hilbert est appliquée, une enveloppe est calculé et enfin un spectre d'enveloppe est obtenu.

3.1 Cas d'un défaut sur la bague extérieure

On considère un défaut sur la bague extérieure de diamètre 0.007 inch pour une charge 0 HP. La figure (2.16) montre le signal vibratoire mesuré côté accouplement et son spectre. Aucune information sur l'existence du défaut n'est possible à partir du signal et du spectre.

Après l'opération de filtrage le signal filtré montre des chocs périodiques très clairs qui sont dus au défaut. Le spectre d'enveloppe montre un pic correspondant parfaitement à la fréquence d'un défaut sur la bague extérieure (107.36 Hz) et plusieurs de ses harmoniques comme le montre la figure (2.17).

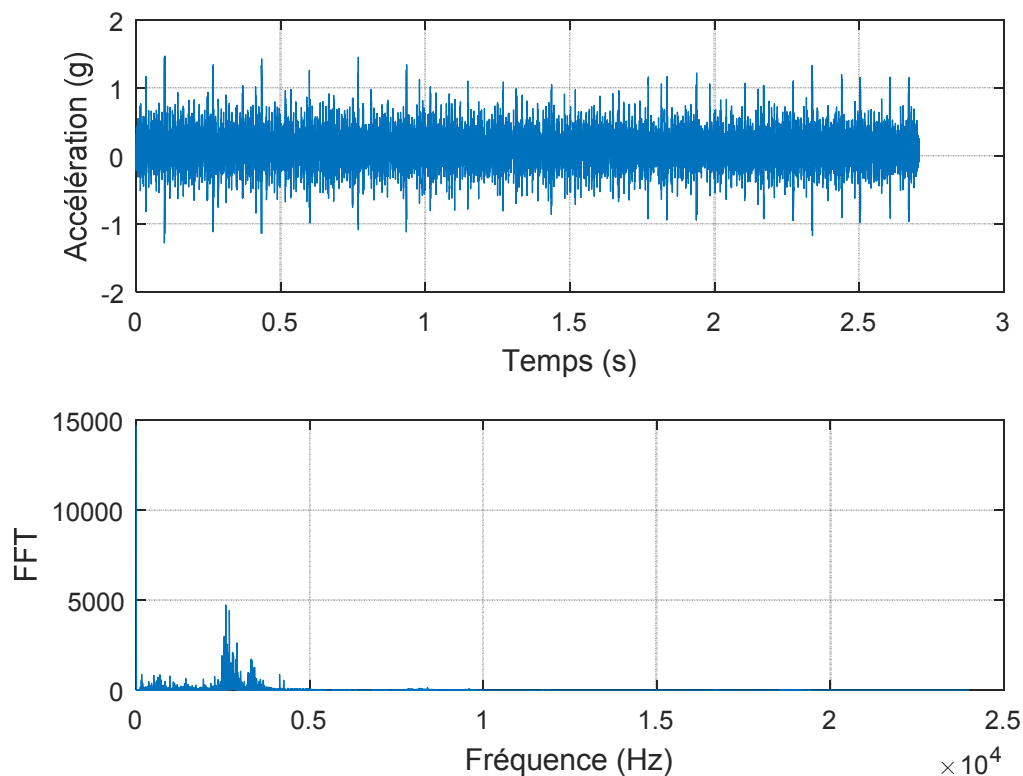


Figure 2.16. Signal d'accélération mesuré et son spectre

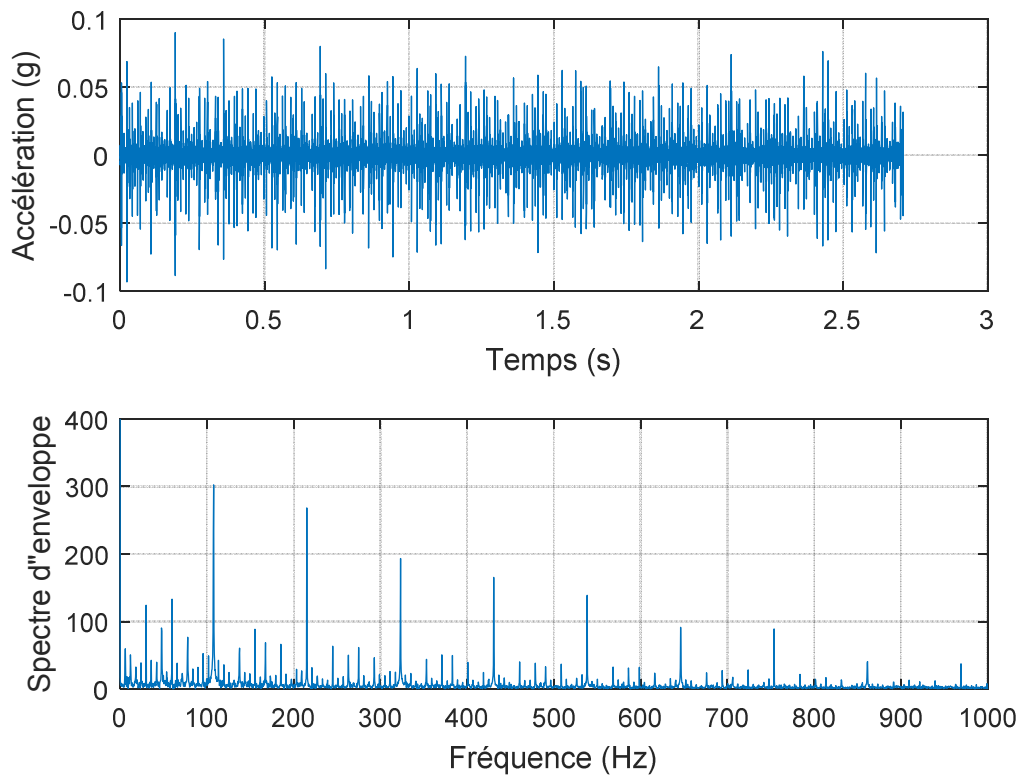


Figure 2.17. Signal d'accélération filtré et son spectre d'enveloppe

Les figure (2.18) et (2.19) montrent les signaux et spectres avant et après filtrage pour le même défaut mais mesuré du côté ventilateur. Malgré que la fréquence du défaut sur la bague extérieurs est lisible sur le spectre d'enveloppe, il reste peu clair que celui calculé coté accouplement ce qui est parfaitement logique car le roulement endommagé est monté côté accouplement.

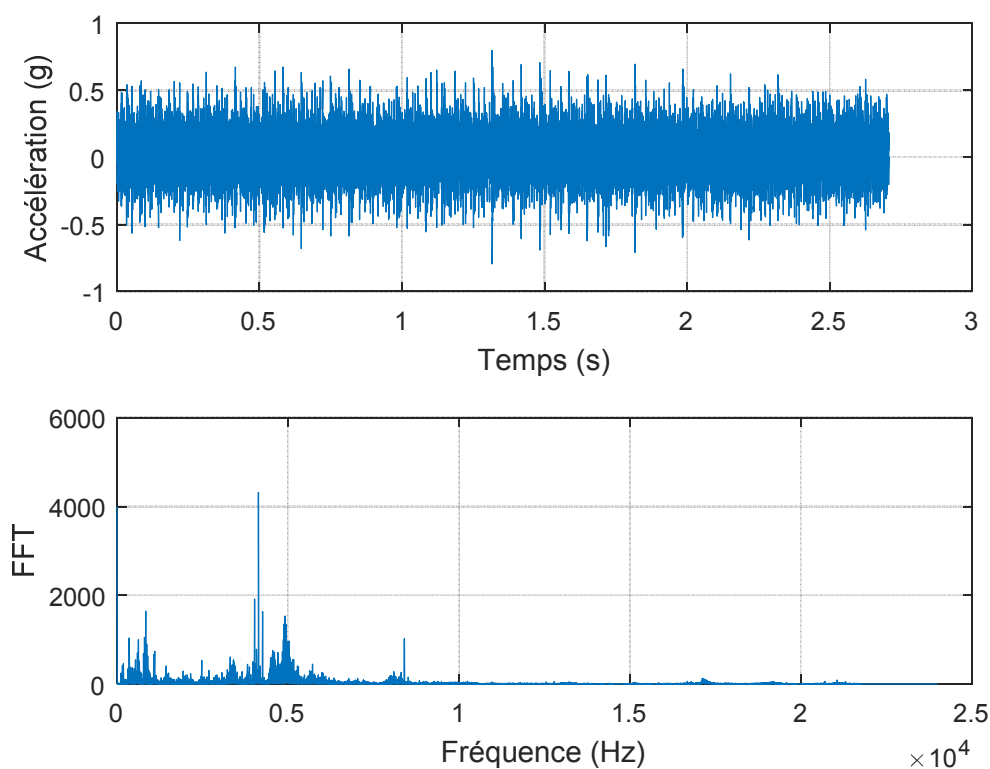


Figure 2.18. Signal de l'accélération mesuré et son spectre

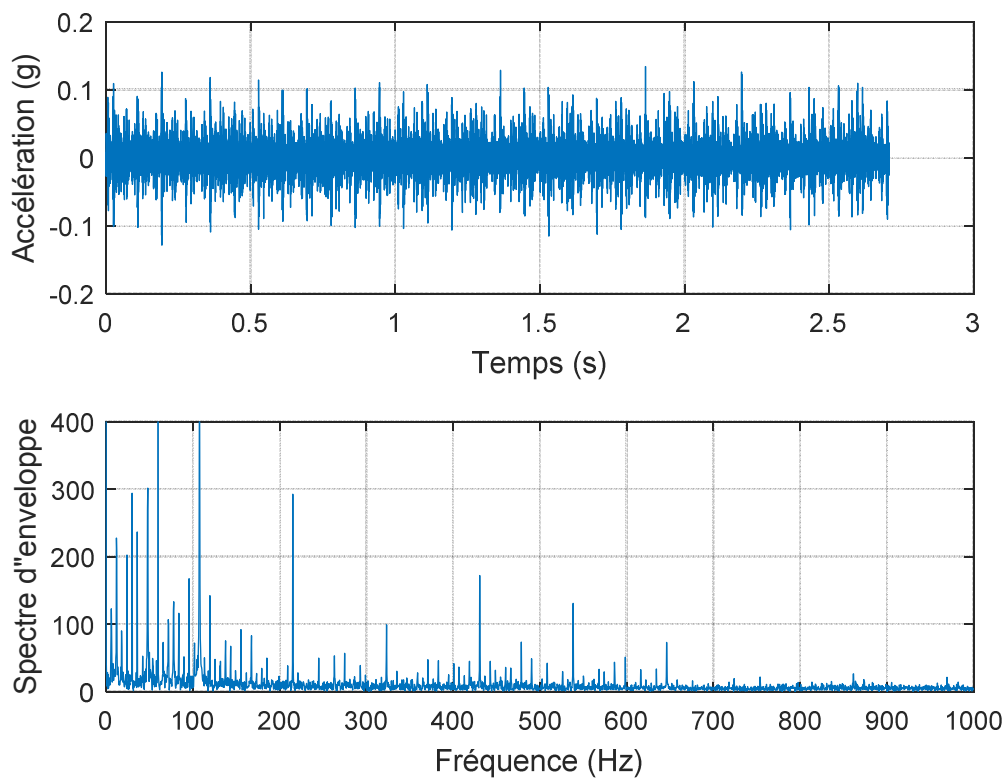


Figure 2.19. Signal de l'accélération filtré et son spectre d'enveloppe

3.2 Cas d'un défaut sur bague intérieure

On considère un défaut sur la bague intérieure de diamètre 0.021 inch pour une charge 2 HP. La figure (2.20) montre le signal vibratoire mesuré côté accouplement et son spectre. Aucune information sur l'existence de défaut n'est possible à partir du signal et du spectre. Après l'opération de filtrage le signal filtré montre des chocs périodiques très clairs qui sont dus au défaut. Le spectre d'enveloppe montre un pic correspondant parfaitement à la fréquence d'un défaut sur la bague intérieure (157.90 Hz) et plusieurs de ses harmoniques comme le montre la figure (2.21).

Le résultat est moins clair pour le cas où le capteur est monté côté ventilateur mais la fréquence d'un défaut sur la bague intérieure et plusieurs de ses harmoniques restent identifiables (figure 2.22).

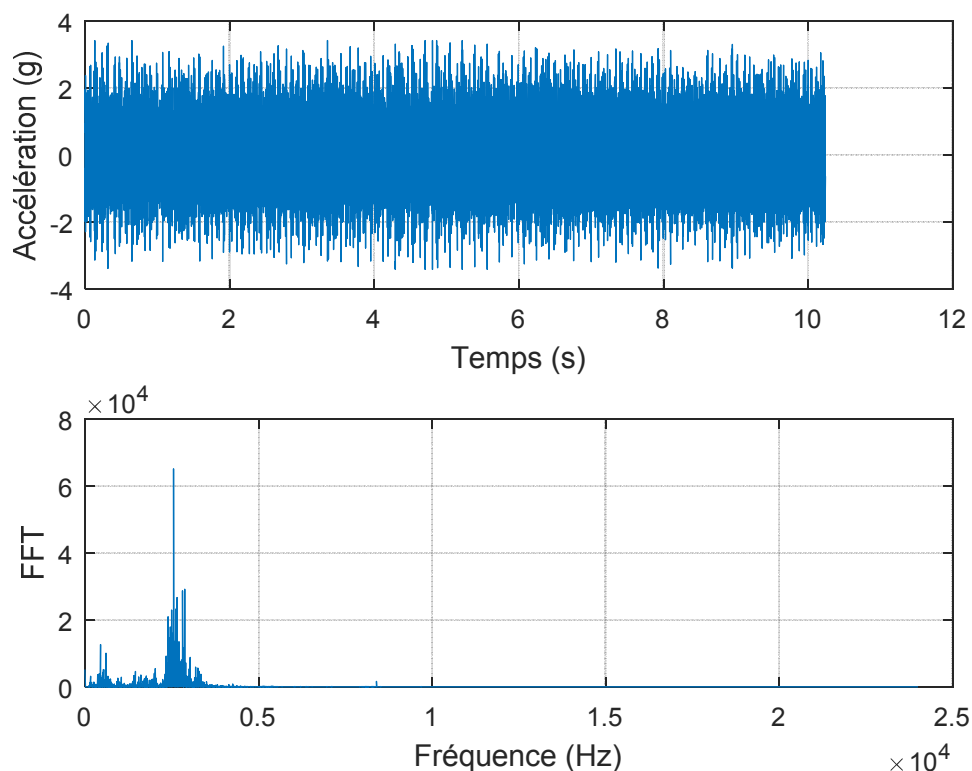


Figure 2.20. Signal de l'accélération mesuré et son spectre

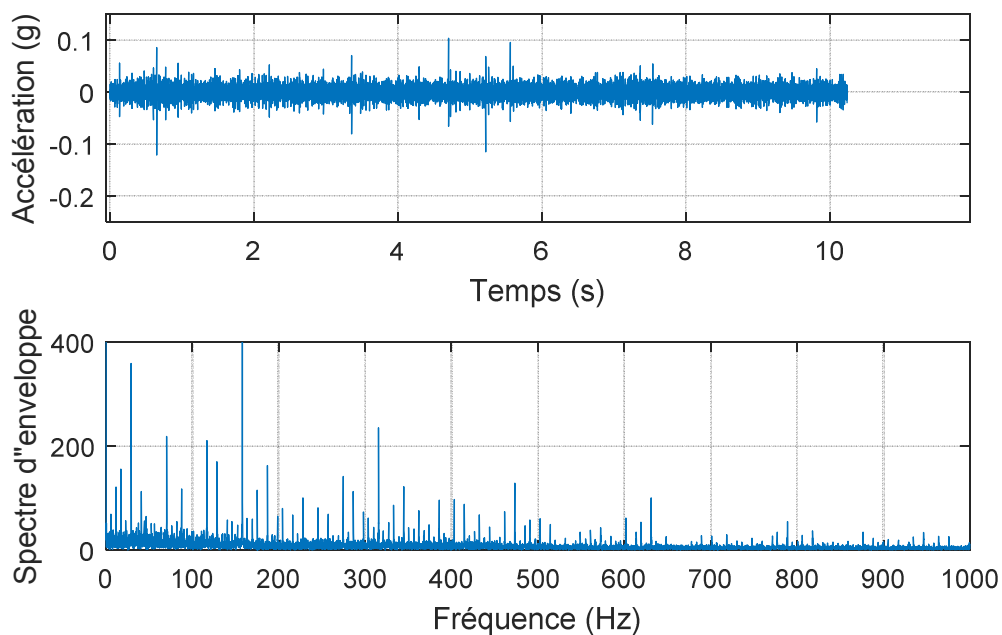


Figure 2.21. Signal de l'accélération filtré et son spectre d'enveloppe

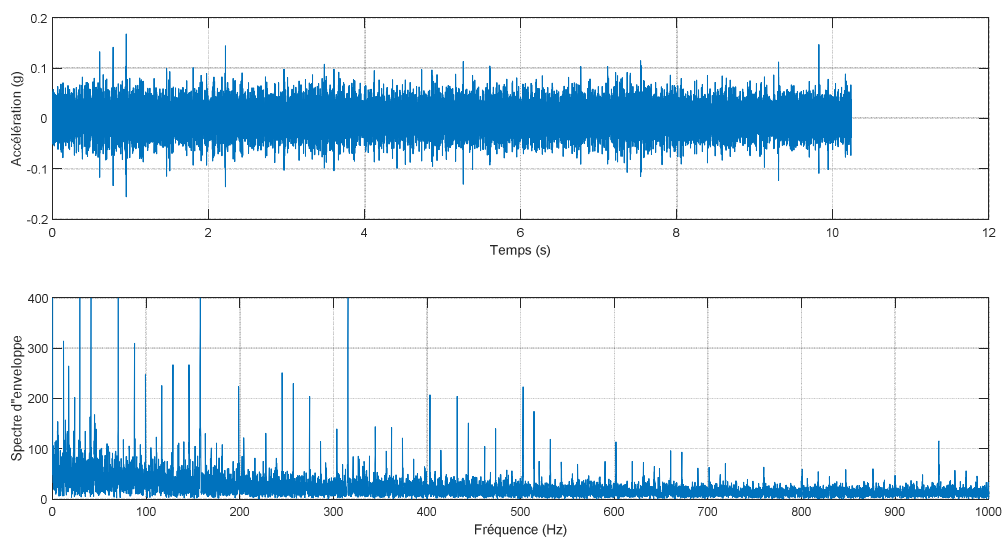


Figure 2.22. Signal de l'accélération filtré et son spectre d'enveloppe avec capteur monté côté ventilateur

4. Conclusion du chapitre

L'objectif de ce chapitre est d'entreprendre une étude visant à détecter les défauts de roulements dans le régime constant par application de deux approches : l'une temporelle basée sur les indicateurs scalaires et l'autre fréquentielle basée sur le spectre d'enveloppe.

Plusieurs paramètres ont été étudiés pour voir leur influence sur les indicateurs scalaires : le type du défaut, sa gravité, la charge appliquée sur le roulement et le filtrage. Les résultats montrent que l'apport du filtrage est considérable et favorise la détection du défaut, bien que le kurtosis et le facteur de crête d'un côté et le RMS et la valeur crête d'un autre côté affichent des tendances opposées.

Généralement parlant, la détection est beaucoup plus évidente pour des charges élevées et pour des gravités importantes. A ce propos, le kurtosis reste l'indicateur le plus sensible aux chocs et donc reste 'outil le plus fiable pour la détection des défauts de roulements notamment après une opération de filtrage.

Pour l'analyse fréquentielle, une approche basée sur le spectre d'enveloppe a été appliquée. Pour un défaut sur la bague extérieure et intérieure, les fréquences caractéristiques sont nettement mises en évidence par le spectre d'enveloppe, alors qu'elles étaient invisibles sur le spectre du signal original mesuré.

Chapitre III : Détection des défauts de roulements en régime variable

Ce chapitre est destiné à la proposition d'une démarche pour la détection des défauts de roulements en régime variable par application de l'analyse d'ordre. Premièrement l'analyse d'ordre est expliquée avec un exemple démonstratif, ensuite les résultats concernant l'analyse de signaux mesurés sur des roulements défectueux en régime variable sont présentés.

1 L'analyse d'ordre

L'analyse d'ordre est une technique de traitement du signal visant à transformer un signal mesuré du domaine temporel au domaine angulaire (ou d'ordre). Cette technique est appliquée à des signaux échantillonnés de manière asynchrone (c'est-à-dire avec une fréquence d'échantillonnage constante en Hertz) pour obtenir le même signal échantillonné à des incréments angulaires. Dans certains cas, le résultat du suivi d'ordre est directement la transformée de Fourier d'un tel signal de domaine angulaire, dont la fréquence homologue est définie comme "ordre". Chaque ordre représente une fraction de la vitesse angulaire.

L'analyse d'ordre couramment utilisée est le ré-échantillonnage angulaire, elle est peu coûteuse en matériel. Elle est basée sur la mesure de la vitesse instantanée, généralement obtenue au moyen d'un tachymètre ou d'un codeur, nécessaire pour estimer la vitesse instantanée et/ou la position angulaire de l'arbre. La mesure du signal vibratoire se fait donc simultanément avec la mesure de la vitesse instantanée (Signal RPM) comme le montre la figure (3.1). Trois grandes familles des techniques d'analyse d'ordre ont été développées dans le passé; l'analyse d'ordre calculée (COT pour Computed Order Tracking), le filtre Vold-Kalman (VKF) et les transformations de suivi d'ordre.

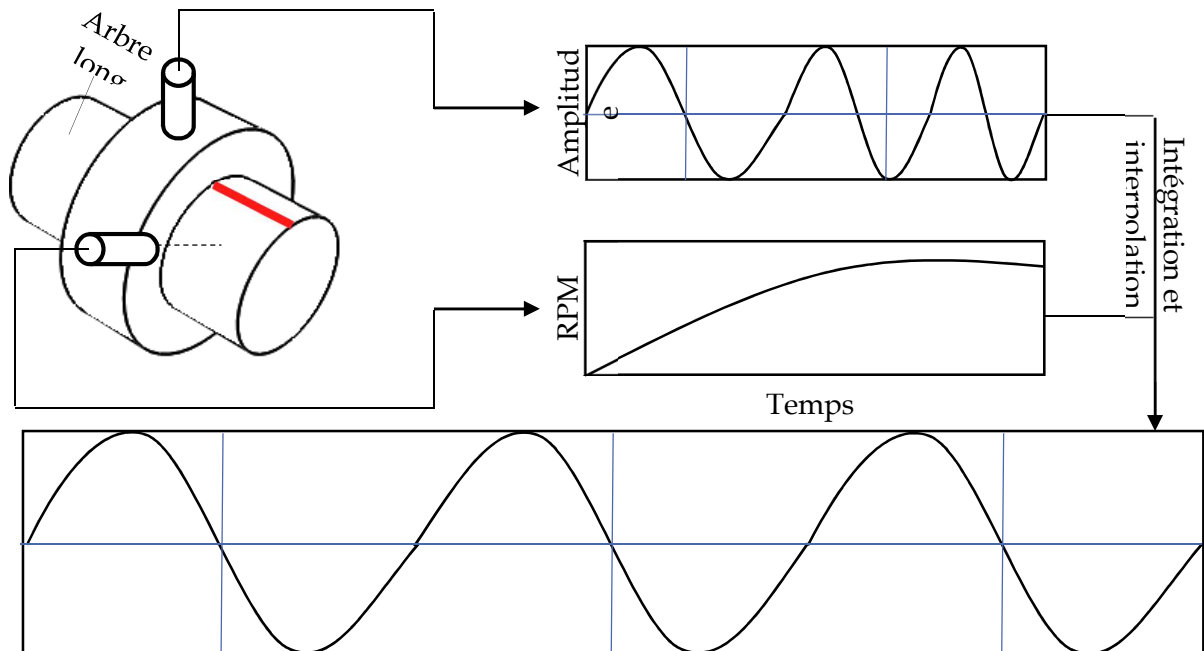


Figure 3.1. Principe du ré-échantillonnage angulaire

1.1 Exemple d'application

Pour comprendre comment l'analyse d'ordre marche nous proposons d'analyser le signal de la figure (3.2). Ce signal est mesuré sur un hélicoptère dans un régime de fonctionnement variable composé d'une accélération puis d'une décélération comme le montre le signal de la vitesse instantanée (RPM). Dans ce cas il est inutile d'utiliser n'importe quel outil classique, car il serait inefficace comme nous l'avons déjà mentionné.

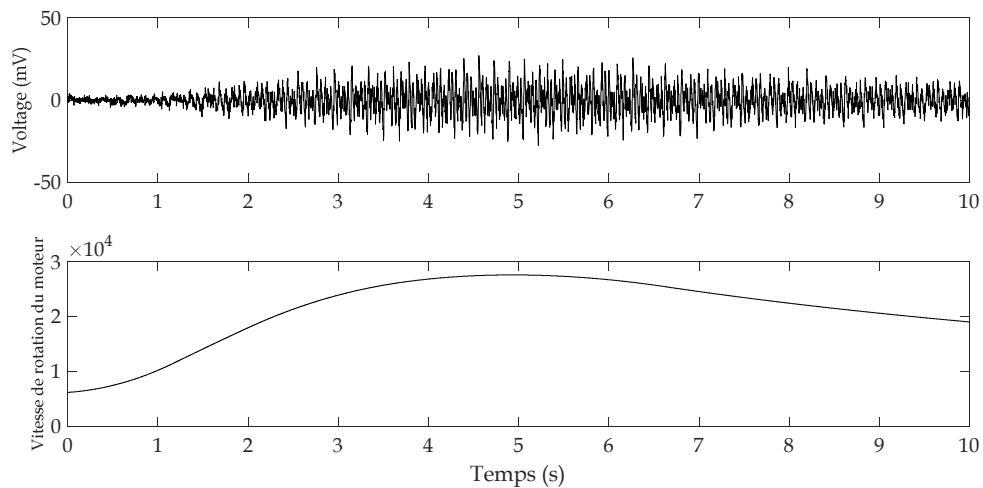


Figure 3.2. Signal vibratoire mesuré dans la cabine d'un hélicoptère (en haut) et son signal RPM (en bas)

La figure (3.3) montre le résultat de l'analyse d'ordre de ce signal où on peut constater deux ordres prépondérants ; le premier correspond à 0.05 et le deuxième à 0.06. Le spectre d'ordre de la figure (3.4) confirme ce résultat et montre deux pics importants à 0.05 et 0.06. Comme nous ne disposons d'aucune donnée cinématique de cet hélicoptère, nous ne pouvons correspondre ces ordres à aucun défaut quelconque.

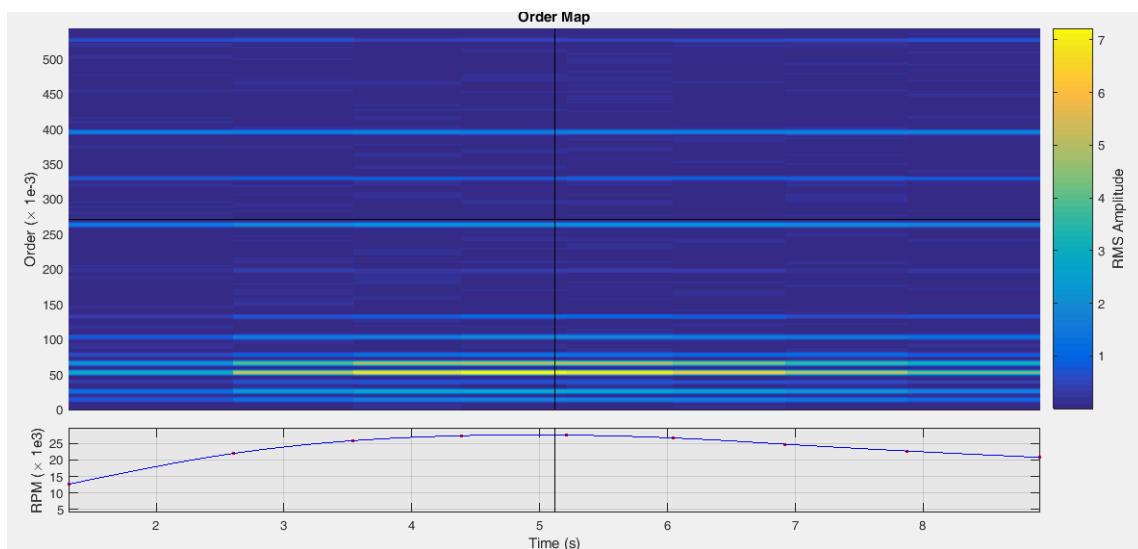


Figure 3.3. Représentation temps-ordre du signal de la figure (3.2)

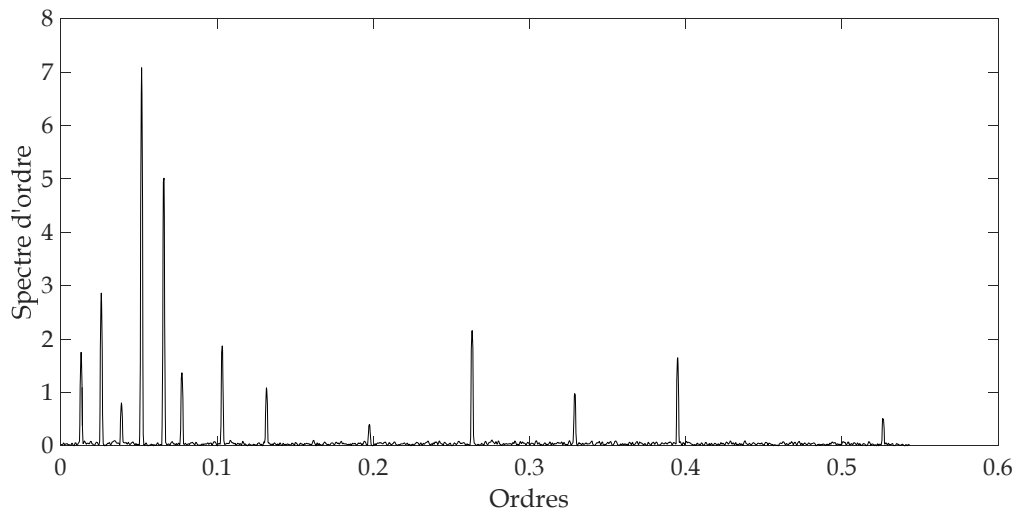


Figure 3.4. Spectre d'ordre du signal de la figure (3.2)

1.2 Application de l'analyse d'ordre pour la détection des défauts de roulements

Comme nous l'avons mentionné au chapitre 1, les défauts de roulements possèdent des fréquences caractéristiques reflétant l'occurrence de chaque type de défaut. Ces fréquences, définies empiriquement, sont calculées à partir des caractéristiques géométriques du roulement et de sa fréquence de rotation. Dans le cas d'un régime variable ces fréquences sont alors elles aussi variables, il est inutile dans ce cas d'avoir recours aux outils classiques comme le spectre ou le spectre d'enveloppe. Il est également inutile d'utiliser n'importe quelle méthode récente de traitement de signal sans avoir éliminé au préalable l'effet de la variation de la vitesse.

Utiliser l'analyse d'ordre est alors la solution à ce problème. Dans ce contexte, le diagnostic va porter sur la détection d'un ordre caractéristique du défaut plutôt que de sa fréquence caractéristique. En examinant les fréquences caractéristiques des quatre familles de défauts de roulements, on peut aisément constater qu'on peut les diviser en deux parties; la première, étant constante, comprend les paramètres géométriques du roulement (C_1 jusqu'à C_4), la deuxième est la fréquence de rotation qui elle est variable. La partie constante de chaque formule

sera désormais appelée ordre du défaut, il est évident d'après le tableau (3.1) que chaque type de défaut a son propre ordre qui le différencie des autres types.

Fréquence du défaut	Expression fréquentielle	Expression en fonction de l'ordre
Fréquence du Défaut sur la Bague Extérieure	$FDBE = N \frac{n}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right)$	$FDBE = C_1 * N$
Fréquence du Défaut sur la Bague Intérieure	$FDBI = N \frac{n}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right)$	$FDBI = C_2 * N$
Fréquence du Défaut sur la Bille ou l'élément roulant	$FDB = N \frac{D}{d} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2 \alpha\right)$	$FDB = C_3 * N$
Fréquence du Défaut sur la Cage	$FDC = N \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right)$	$FDC = C_4 * N$

Tableau 3.1. Définition des ordres des défauts de roulements

2 Plan expérimental et matériel de mesure

2.1 Banc d'essais Machinery Fault Simulator (MFS)

Le simulateur des défauts de machines (Machinery Fault Simulator) est un banc d'essais de simulation des défauts de machines tournantes fabriqué et commercialisé par l'entreprise Américaine « SpectraQuest ». C'est un outil efficace pour l'étude des différents défauts pouvant se manifester sur les machines tournantes en vue de la compréhension de leurs images vibratoires. Associé à son logiciel de traitement des données (VibraQuest® Pro), il permet,

en plus de l'acquisition des signaux mesurés, plusieurs autres outils d'analyse. Outre son utilisation dans le domaine de recherche, il permet l'imprégnation des concepts et de la méthodologie de la pratique de la maintenance prédictive par analyse vibratoire aux étudiants sensés pratiquer la maintenance industrielle dans leur carrière professionnelle. Il est également tout à fait adéquat pour la formation du personnel de maintenance du secteur industriel dans le domaine de l'analyse vibratoire et donne l'opportunité, grâce à ses différents kits d'utilisation, de simuler tous les défauts qu'ils ont l'habitude de rencontrer en pratique.

2.1.1 Utilisations possibles du MFS

Comme mentionné auparavant, le MFS permet la simulation de plusieurs défauts de machines tournantes, en voici quelques-uns :

1. Etude du balourd ;
2. Etude du mésalignement ;
3. Etude des défauts de roulements ;
4. Etude des accouplements ;
5. Etude d'un rotor voilé et/ou excentré ;
6. Etude de la résonance ;
7. Dynamique des rotors ;
8. Etude des ventilateurs ;
9. Analyse du courant électrique, ...etc.

2.1.2 Description du MFS

Le MFS est une mini-machine ou une machine-école destinée à des fins pédagogiques et de recherche. Il est donc d'une conception très simple permettant de simuler plusieurs types de défauts dans un temps minime. La figure (3.5) montre une photo réelle du MFS, celui-ci est composé principalement d'un arbre tournant entraîné par un moteur électrique. L'arbre

est guidé en rotation par deux roulements à billes et peut supporter des disques tournants pour simuler un défaut de balourd par exemple. Le MFS est muni d'un variateur de vitesse et d'un tachymètre à affichage digital permettant la mesure instantanée de la vitesse de rotation. La figure (3.6) montre les organes constitutifs du MFS.

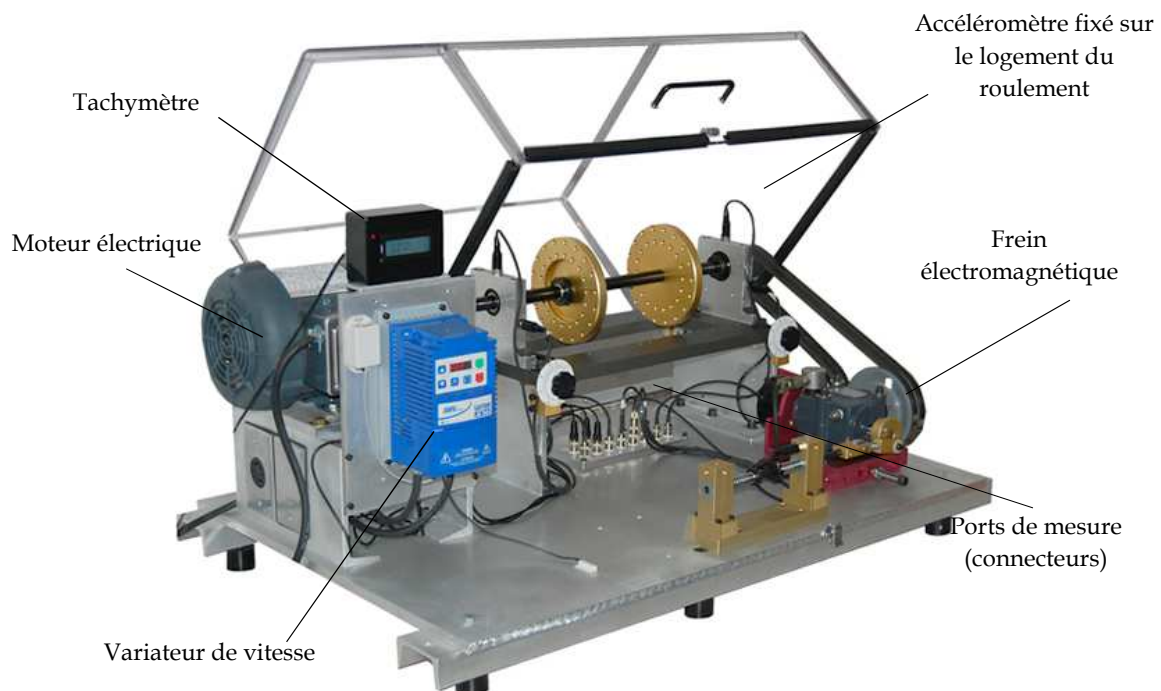
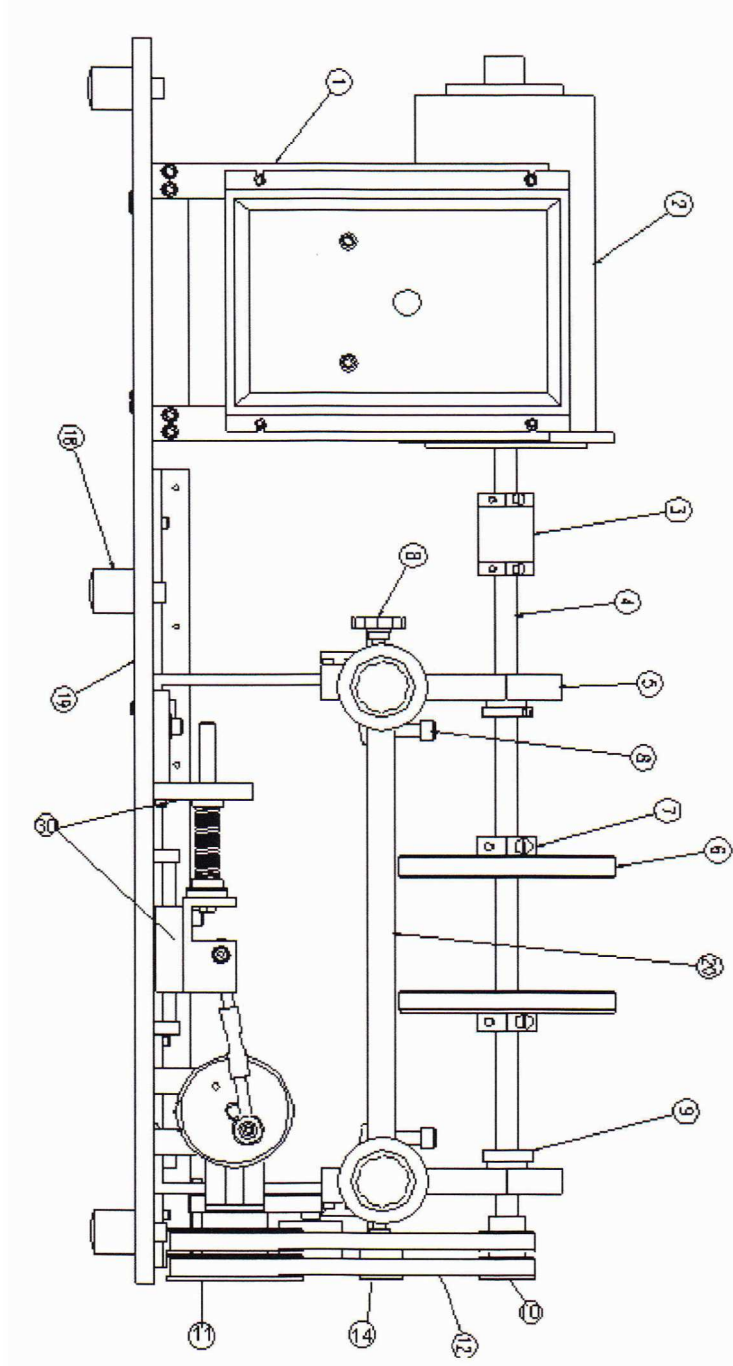


Figure 3.5. Photo du banc d'essais MFS

2.2 Acquisition des signaux mesurés

L'acquisition des signaux mesurés est assurée par des accéléromètres fixés par filetage sur les logements des deux roulements dans les deux directions. Le MFS est muni de 16 ports de connexions permettant de réaliser 16 mesures à la fois (15 mesures vibratoires données par les accéléromètres plus la mesure de la vitesse de rotation via le tachymètre). Ces ports sont alors connectés à des ports extérieurs permettant l'acheminement des mesures à une carte d'acquisition installée sur un PC. Ce PC est muni du logiciel d'acquisition et de traitement « VibraQuest Pro » permettant l'utilisation de plusieurs outils d'analyse, tel que le spectre, l'analyse

statistique, ...etc. Dans notre cas, juste le signal temporel est acquis à travers le logiciel, le post-traitement s'effectue sur environnement Matlab.



1. Variateur de vitesse
2. Moteur électrique
3. Accouplement
4. Arbre
5. Logement de roulement
6. Disque tournant avec trous pour simulation du balourd
7. Introduction du mésalignement
8. Roulement
9. Petite poulie pour courroie
10. Grande poulie pour courroie
11. Double courroie
17. Frein magnétique
18. Appuis
19. Base

Figure 3.6. Organes constitutifs du simulateur (vue de face)

Le MFS est muni d'un kit de quatre roulements avec quatre types de défauts ponctuels livrés avec la machine ; sur la bague extérieure, sur la bague intérieure, sur la bille et un roulement avec défaut mixte. Les mesures sont effectuées sur le roulement coté courroie car le montage et le démontage est facile (figure 3.7). Les caractéristiques des roulements utilisés sont données par le tableau (3.2).

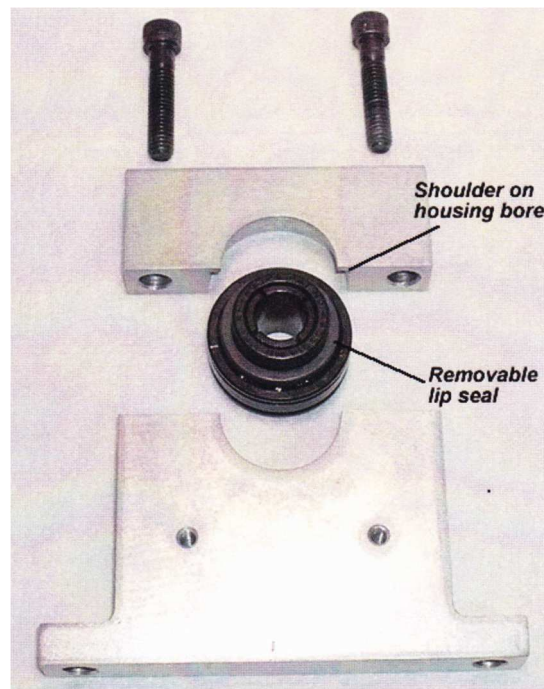


Figure 3.7. Montage du roulement testé dans son logement

Nombre de billes	Diamètre moyen (inch)	Diamètre de la bille (inch)	Ordre DBE	Ordre DBI	Ordre DB	Ordre DC
8	1,318	0,378	3,05	4,95	1,99	0,38

DBE : Défaut sur la Bague Extérieure

DBI : Défaut sur la Bague Intérieure

DB : Défaut sur la Bille

DC : Défaut sur la Cage

Tableau 3.2. Caractéristiques géométriques et ordres des défauts pour les roulements utilisés

3 Résultats et discussion

3.1 Cas d'un défaut sur la bague extérieure en accélération

La figure (3.8) représente le signal d'un défaut de la bague extérieure mesuré en accélération de 0 à 1800 RPM en 34 secondes. Son spectre ne donne aucune information sur l'existence du défaut puisque le régime est variable. Même après filtrage (figure 3.9), ni le signal filtré ni son spectre d'enveloppe ne donnent d'information sur le défaut, les fréquences localisées sur le spectre n'ont aucune signification.

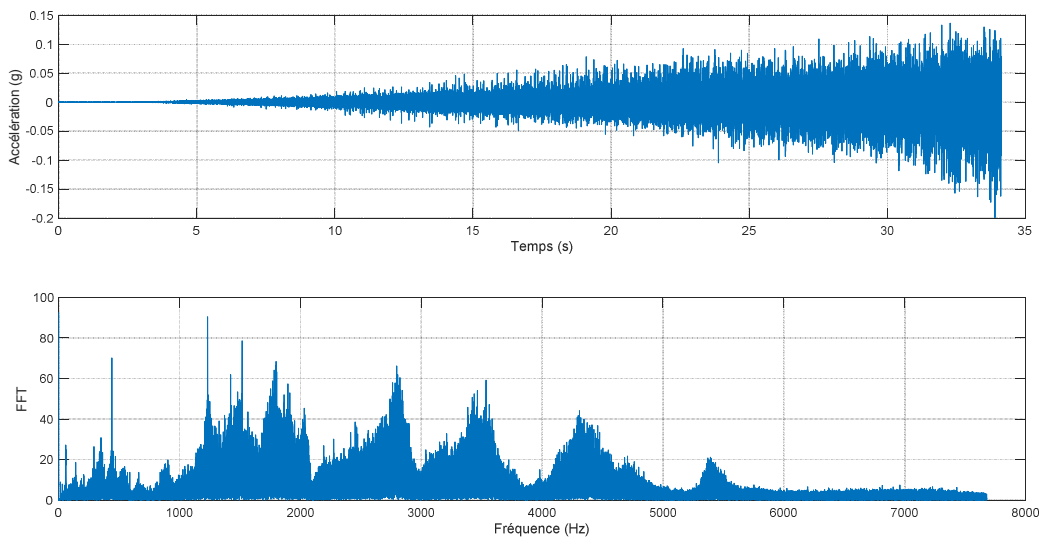


Figure 3.8. Signal de l'accélération mesuré et son spectre

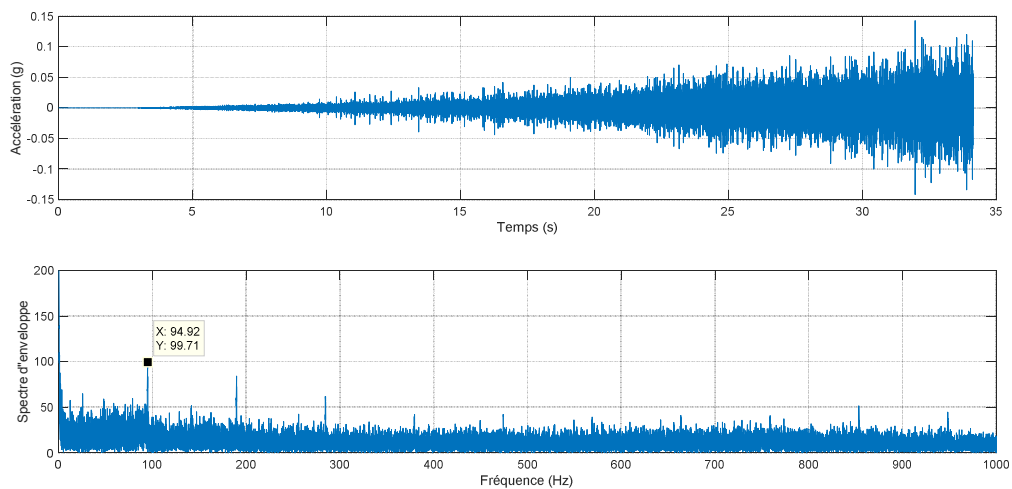


Figure 3.9. Signal de l'accélération filtré et son spectre d'enveloppe

Après l'application de l'analyse d'ordre, le spectre d'ordre de la figure (3.10) montre un pic correspondant à 3.2 et plusieurs de ses harmoniques. Cette composante correspond parfaitement à l'ordre d'un défaut sur la bague extérieure (3.05) avec un petit décalage qui est tout à fait logique en pratique.

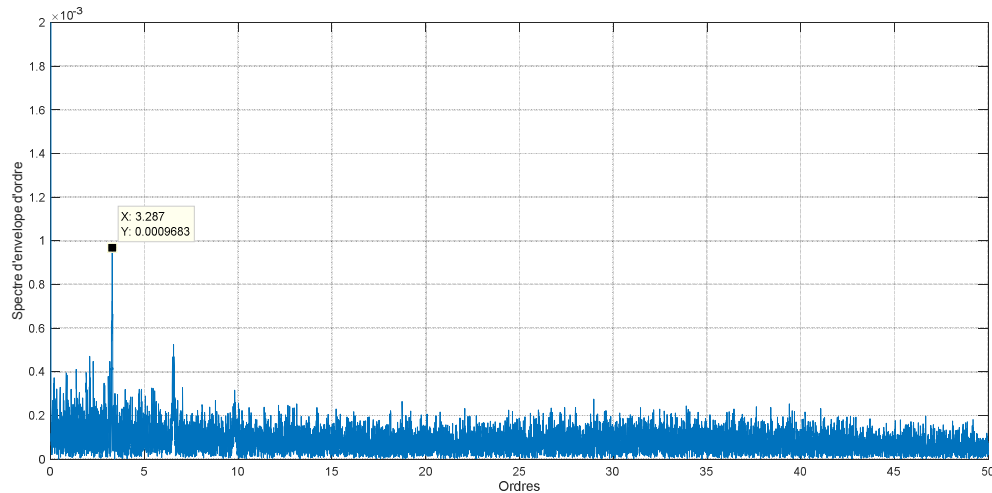


Figure 3.10. Spectre d'enveloppe d'ordre dans le cas d'un défaut sur la bague extérieure en cas d'accélération

3.2 Cas d'un défaut sur la bague extérieure en décélération

Nous considérons maintenant le cas d'un défaut sur la bague extérieure mais en décélération de 1800 RPM à 0 RPM en 34 secondes. Comme il s'agit du même roulement qu'auparavant, l'ordre du défaut est le même.

On remarque que dans ce cas les amplitudes du signal sont décroissantes contrairement au cas de l'accélération. Ni le signal ni le spectre ne sont en mesure de donner la moindre information sur l'existence d'un défaut (figure 3.11). Même après l'opération de filtrage, ni le signal filtré ni son spectre d'enveloppe ne donnent eux aussi d'informations sur le défaut. Les composantes fréquentielles mises en évidence par le spectre d'enveloppe n'ont aucune signification puisque le régime est variable (figure 3.12).

Après l'application de l'analyse d'ordre, le spectre d'ordre de la figure (3.13) montre un pic correspondant à 3.2 et plusieurs de ses harmoniques. Cette

composante correspond parfaitement à l'ordre d'un défaut sur la bague extérieure (3.05) avec un petit décalage qui est tout à fait logique en pratique.

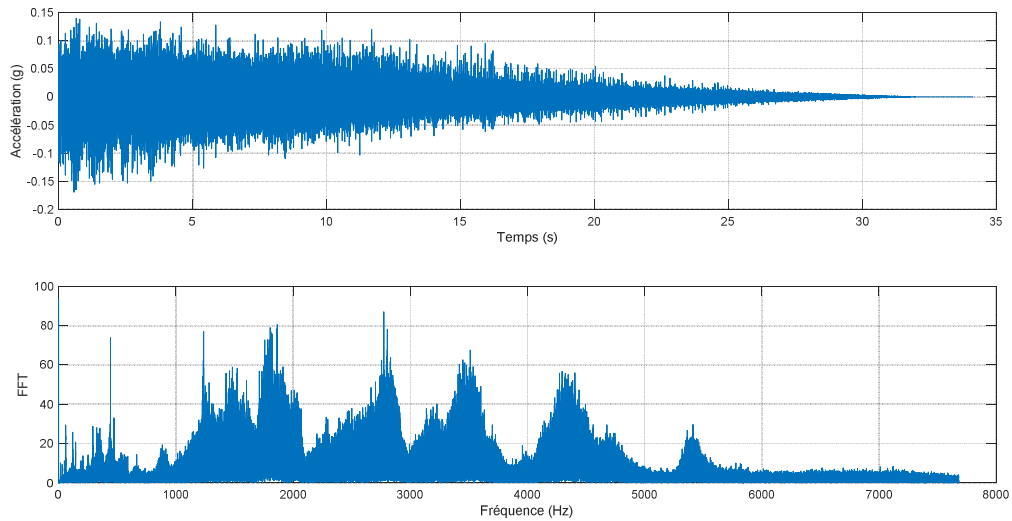


Figure 3.11. Signal de décélération mesuré et son spectre

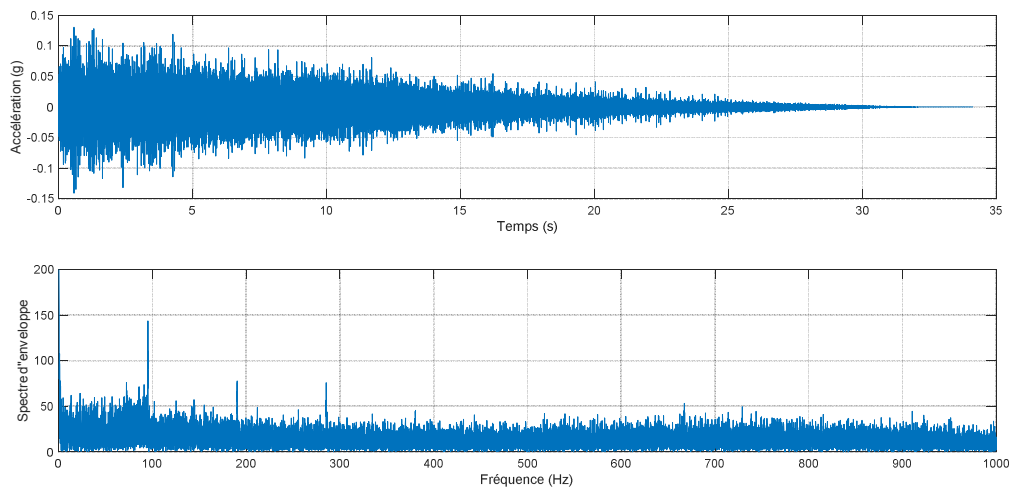


Figure 3.12. Signal de décélération filtré et son spectre d'enveloppe

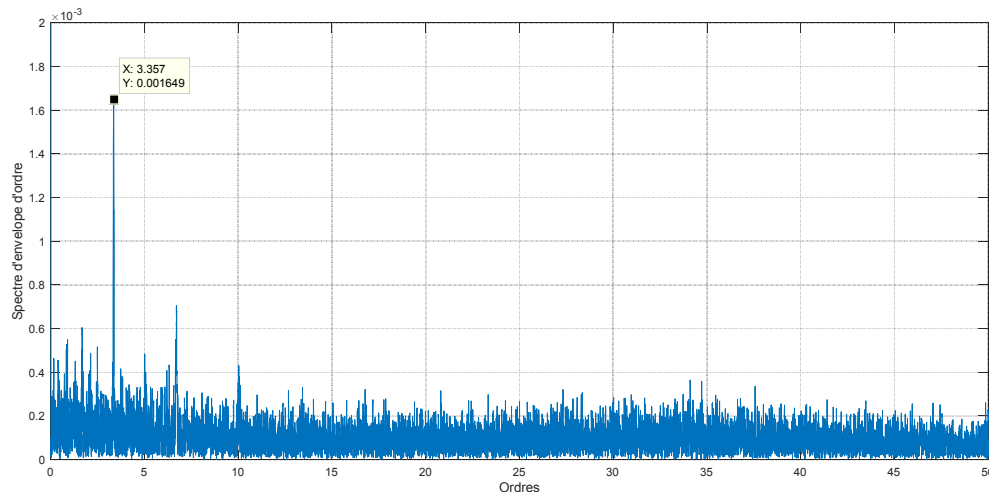


Figure 3.13. Spectre d'enveloppe d'ordre dans le cas d'un défaut sur la bague extérieure en cas de décélération

3.3 Cas d'un défaut sur la bague intérieure

Dans ce cas on considère un roulement du même type mais avec un défaut sur la bague intérieure en accélération de 0 à 1800 RPM en 34 secondes. L'ordre d'un défaut sur la bague intérieure pour ce type de roulements est égal à 4.95 (voir tableau 3.2). La figure (3.14) montre le signal mesuré et son spectre où nous ne pouvons déceler aucune information sur l'existence du défaut.

Après filtrage, nous constatons les mêmes remarques que pour le cas d'un défaut sur la bague extérieure : ni le signal filtré ni son spectre d'enveloppe ne sont capables de mettre en évidence le défaut. Le spectre d'enveloppe met en évidence une multitude de composantes fréquentielles, mais qui demeurent sans aucune signification particulière (figure 3.15).

Après l'application de l'analyse d'ordre, le spectre d'ordre montre clairement une composante égale à 5 et plusieurs de ses harmoniques. D'après le tableau (3.2), cette composante correspond parfaitement à l'ordre d'un défaut sur la bague intérieure (figure 3.16).

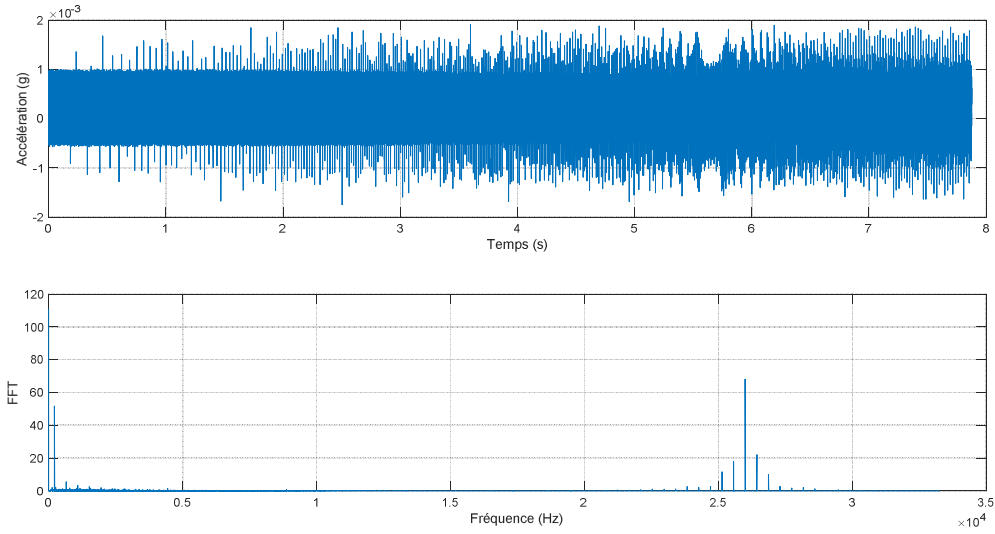


Figure 3.14. Signal de l'accélération mesuré et son spectre

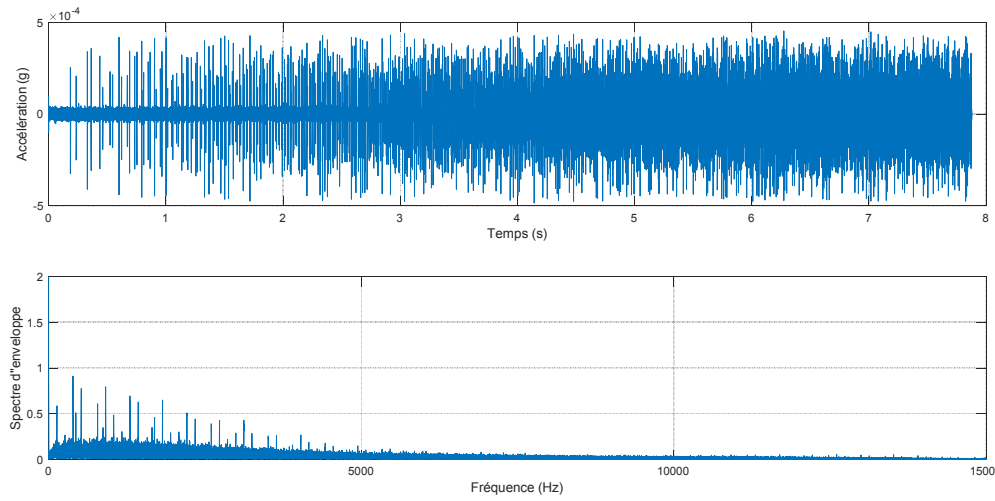


Figure 3.15. Signal de l'accélération filtré et son spectre d'enveloppe

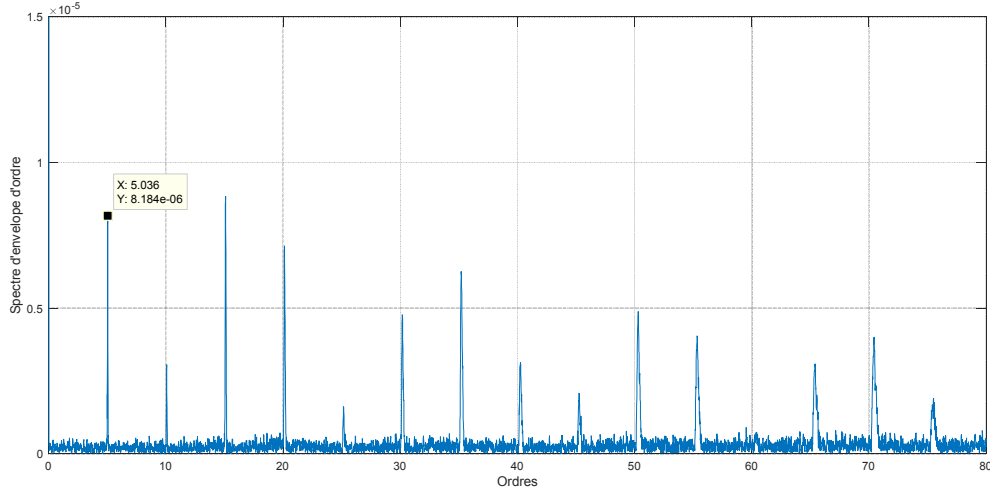


Figure 3.16. Spectre d'enveloppe d'ordre dans le cas d'un défaut sur la bague intérieure en cas de d'accélération

4. Conclusion du chapitre

Le but de ce chapitre est de proposer une démarche pour la détection des défauts de roulements en régime variable. Cette démarche est la même que celle utilisée au chapitre 3, mais en ajoutant à la fin l'analyse d'ordre puisque le régime est variable.

Les résultats montrent que le spectre d'enveloppe, malgré qu'il a donné d'excellents résultats pour le régime constant (cf. chapitre 3), est incapable dans le régime variable de donner la moindre information. A l'inverse, le spectre d'ordre met toujours en évidence l'ordre correspondant au défaut et plusieurs de ses harmoniques.

L'association de l'analyse d'enveloppe et l'analyse d'ordre a donné de très bons résultats, validés sur deux types de défaut (sur la bague extérieure et intérieure) et avec deux modes de variation de la vitesse (en accélération et en décélération).

Conclusion générale

Le travail entamé dans ce mémoire entre dans le cadre de la maintenance préventive des machines tournantes par analyse vibratoire. Cette dernière est devenue un outil puissant pour surveiller l'état de fonctionnement d'une machine à tout moment grâce à des indicateurs spéciaux statistiques et spectraux que l'on peut calculer à partir des signaux vibratoires que produisent ces machines.

Notre travail s'est porté donc sur l'application de deux méthodes pour la détection des défauts de roulements. L'objectif principal de notre travail visait deux points :

- La détection des défauts de roulements en régime constant
- La détection des défauts de roulements en régime variable

Pour le régime constant deux approches ont été utilisées ; l'une temporelle basée sur quatre indicateurs scalaires et l'autre fréquentielle basée sur le spectre d'enveloppe. Pour l'approche temporelle, les résultats ont montré que le RMS et la valeur crête sont sensibles à l'énergie du signal, alors que le kurtosis et le facteur de crête sont sensibles à sa forme, donc aux chocs induits par le défaut. L'influence de plusieurs paramètres a été étudiée : la taille du défaut, la charge appliquée au roulement, le type du défaut, ...etc. Dans toutes ces configurations, le RMS et la valeur crête d'un côté et le kurtosis et le facteur de crête d'un autre côté affichent dans la plupart des cas des tendances opposées. Néanmoins, le kurtosis reste l'indicateur le plus sensible pour la détection des défauts de roulements, notamment pour des charges élevées et pour des tailles modérées du défaut. Pour l'approche fréquentielle, le spectre d'enveloppe a permis de mettre en évidence la fréquence caractéristique du défaut et plusieurs de ses harmoniques, permettant ainsi une détection claire de défauts considérés.

En régime variable, une approche basée sur l'analyse d'ordre et le spectre d'enveloppe a été proposée. Les résultats montrent que le spectre d'enveloppe de fréquence est incapable de mettre en évidence le défaut en cas du régime variable. L'utilisation de l'analyse d'ordre a permis donc de résoudre ce problème et de permettre d'avoir des spectre d'enveloppe d'ordre où l'ordre du défaut a été, à chaque fois, mis en évidence.

Références bibliographiques

- [1] M. L. BOUHALAIS, Développement et mise en œuvre d'outils de surveillance des machines tournantes par analyse vibratoire en régime variable. Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2019.
- [2] T. BAALI, Application de L'ensemble de décomposition en mode empirique (EEMD) pour la détection des défauts de roulements en régime variable. Mémoire de master, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2017.
- [3] I. KHELFI, Diagnostic des machines tournantes par les techniques de L'intelligence artificielle. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba, 2014.
- [4] M. K. BABOURI, Surveillance de L'évolution de L'usure d'un outil de coupe en tournage. Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2016.
- [5] X. MILISEN, Comparaison de différentes méthodes de détection de défauts dans les roulements, Revus Scientifique des ISILF n°20, 2006, 158-171.
- [6] H. BOUGHOUAS, Analyse des défauts de denture et leurs influences sur les transmissions mécaniques par engrenages, Thèse de Magister, Université de Mantouri, Constantine 2007.
- [7] M. DJOUADA, Etude des performances de la classification par couplage réseaux de neurones artificiels (RNA) – algorithmes génétiques (AG) : application au diagnostic vibratoire, Thèse magister, UFAS. 2008.
- [8] B. TRAJIN, Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones, Thèse de l'université de TOULOUSE, 2009.