

Evaluation des indicateurs de surveillance par analyse vibratoire : Application aux engrenages et roulements

Abdelhakim Boukar¹ and Nacer Hamzaoui²

¹Département de Génie Mécanique, Institut National Supérieur des Sciences et Techniques d'Abéché - INSTA, BP 130 Abéché, Tchad

²Département de Génie Mécanique Conception, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France

Copyright © 2019 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: In this paper, we evaluate several criteria of vibration analysis signal in the temporal field. The objective is to evaluate their ability to detect a single or multiple fault, their ability to evaluate the severity of a bearing fault, and their ability to detect sound gearing or faulty gearing in different fault configurations created on the gear and bearing mounted on an experimental test stand. In order to evaluate the robustness of each criterion, operating parameters of the machines are taken into account in the experimental design to carry out tests under various conditions of use of the machine. We take into account parameters such as speed and load that we experiment different values to determine their influences on the criteria studied. If we identify the criterion under these conditions, then it is very likely that this is the appropriate criterion to detect the type of defect involved.

KEYWORDS: Monitoring, vibration analysis, fault detection, scalar indicators.

RESUME: Dans ce document, nous évaluons plusieurs critères d'analyse des signaux de vibrations dans le domaine temporel en vue d'évaluer leur capacité à détecter un défaut simple ou multiple, leur capacité à évaluer la gravité d'un défaut de roulement, et encore leur capacité à détecter un engrenement sain ou un engrenage défectueux dans différentes configurations de défauts créés sur l'engrenage et sur le roulement montés sur un banc d'essai expérimental. Dans l'optique d'évaluer la robustesse de chaque critère, des paramètres de fonctionnement des machines sont pris en compte dans le plan d'expériences pour réaliser des essais dans des conditions variées d'utilisation de la machine. Nous prenons en compte des paramètres tels que la vitesse et la charge que nous expérimentons différentes valeurs pour déterminer leurs influences sur les critères étudiés. Si l'on identifie le critère dans ces conditions, il est alors fort probable que c'est le critère approprié pour détecter le type de défaut concerné.

MOTS-CLEFS: Surveillance, analyse vibratoire, détection de défauts, indicateurs scalaires.

1 INTRODUCTION

La maintenance conditionnelle est efficace et indispensable pour maintenir les machines en état de fonctionnement et permet d'augmenter la productivité. Elle consiste à surveiller la machine à partir des données prélevées régulièrement et analysées, afin d'intervenir au moment opportun pour éviter un incident. Elle se base sur plusieurs méthodes d'analyses scientifiques et techniques qui sont par exemple l'analyse vibratoire [1], l'analyse d'huile [2], la thermographie infrarouge ou encore par la perception sonore [3], [4].

Dans notre cas, nous nous limitons à l'analyse vibratoire. Dans ce domaine, des travaux ont été réalisés par les auteurs Djebala et al. [5], [6]. D'ailleurs une synthèse de leurs travaux a été faite par Djebala [7]. Dans ces travaux, ils ont proposé une méthode basée sur l'analyse multirésolution en ondelettes et la transformée de Hilbert pour détecter les défauts simples et

multiples d'engrenage. Ils ont montré à partir d'un résultat expérimental et de simulation de signal contenant une modulation de phase et d'amplitude, que d'une part, les petits défauts ne sont ni détectés par le spectre, ni par le cepstre, mais que le spectre d'enveloppe a permis de mettre en évidence la fréquence modulante et plusieurs de ses harmoniques, même dans le cas des défauts combinés pignon-roue.

D'autre part, ils montrent que le Kurtosis est un outil qui détecte mieux les défauts dans les signaux de choc comparé au facteur de crête. Ils montrent également que la détection est meilleure lorsque le roulement est graissé ou lorsque les engrenages sont chargés, et que le Kurtosis augmente en fonction de la taille du défaut. Parallèlement à leurs travaux, dans cet article, nous montrons que le kurtosis n'est pas en mesure de détecter la gravité d'un défaut de roulement par rapport à un autre défaut sur le roulement. D'autres critères sont également évalués dans ce travail.

Les auteurs, Antoni et Sidahmed [8] ont présenté brièvement différentes méthodes pour le diagnostic des défauts dans les signaux acoustiques et vibratoires, applicables aux signaux stationnaires ou non stationnaires.

Dans le cas des signaux non stationnaires, notamment des signaux cyclostationnaires où la vitesse est variable, l'analyse directe du signal ne donnerait pas un résultat correct car le nombre de points n'est pas le même dans chaque période du signal. Des techniques de traitement des signaux spécifiques sont requises pour compléter ou améliorer les méthodes présentées [9].

Pour analyser les signaux dans ce contexte, une démarche consiste à ré-échantillonner le signal (re-échantillonnage angulaire), d'appliquer la moyenne synchrone pour éliminer les composantes du premier ordre du signal, d'appliquer le filtrage [10], et enfin d'appliquer la corrélation spectrale pour détecter les défauts du second ordre. Lejeune et al. [11] présentent également des travaux sur les cyclostationnarités d'ordre 1 et 2 appliquées aux signaux vibratoires d'engrenages. Dans les sections suivantes, nous présentons notre démarche pour le travail.

2 SYSTÈME D'EXPÉRIMENTATION

2.1 INSTRUMENTATION ET MESURE

Le banc d'essai sur lequel sont réalisées nos expériences est présenté sur la figure 1.

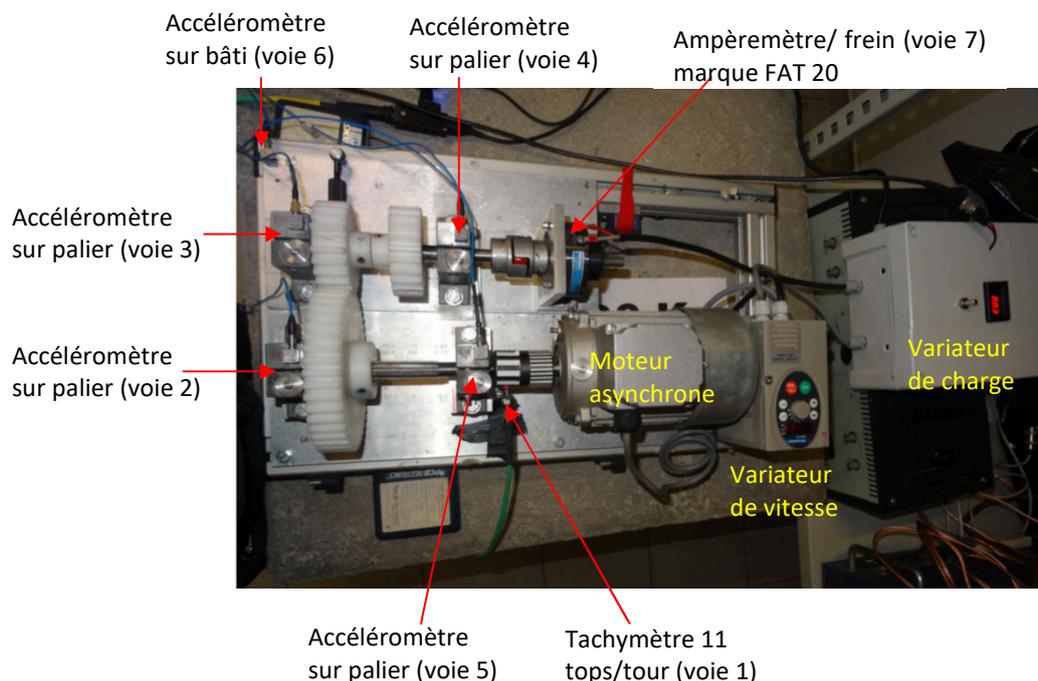


Fig. 1. Banc d'essai de vibration

Pour enregistrer les signaux, nous relierons sept voies à l'entrée de l'analyseur - enregistreur OROS. Cinq voies (2, 3, 4, 5 et 6) reliés aux accéléromètres placés à différents points du système, la voie 1 enregistre les signaux du tachymètre placé à proximité de l'arbre primaire, et qui mesure le nombre de tops/tour et enfin la voie 7 relie le frein monté sur l'arbre secondaire à l'OROS. Les signaux sont échantillonnés à la fréquence de 51200 Hz. Le tableau 1 donne les caractéristiques mesure.

Tableau 1. Caractéristiques mesure

Enregistreur OROS	Capteur			Autres informations	
N° de voie	Nom / Type	Sensibilité	Bande max	Caractéristique	Valeur / type
Voie 1	Tachymètre / Translation	1 V / Hz	10 Hz	Type moteur	Mot élect. Asyn
Voie 2	Accéléromètre / Translation	10,173 mV / m/s ²	980 m/s ²	Puissance moteur	0.18 KW
Voie 3	Accéléromètre / Translation	10.102 mV / m/s ²	990 m/s ²	Vitesse nominale moteur	1360 tr/min
Voie 4	Accéléromètre / Translation	10.959 mV / m/s ²	912 m/s ²	Fréq. d'échantillonnage	51200 Hz
Voie 5	Accéléromètre / Translation	10.255 mV / m/s ²	980 m/s ²	Bande de fréquence	20000 Hz
Voie 6	Accéléromètre / Translation	10.765 mV / m/s ²	929 m/s ²	Temps d'acquisition	≈ 10 - 15 s
Voie 7 (frein)	Ampèremètre / Translation	15 mV / A	2.11 A	Résolution tachymètre	11tops/tour

Un accéléromètre mesure les vibrations plus les défauts. Le souci est de placer le capteur au bon endroit pour récupérer les signaux des chocs dans les roulements et engrenages. Les accéléromètres que nous avons fixés sur le système délivrent des signaux avec la même allure à la différence d'amplitudes près (fig.2). La figure 2 montre les signaux d'accéléromètres dans le cas d'un signal sain sans charge à 10 Hz.

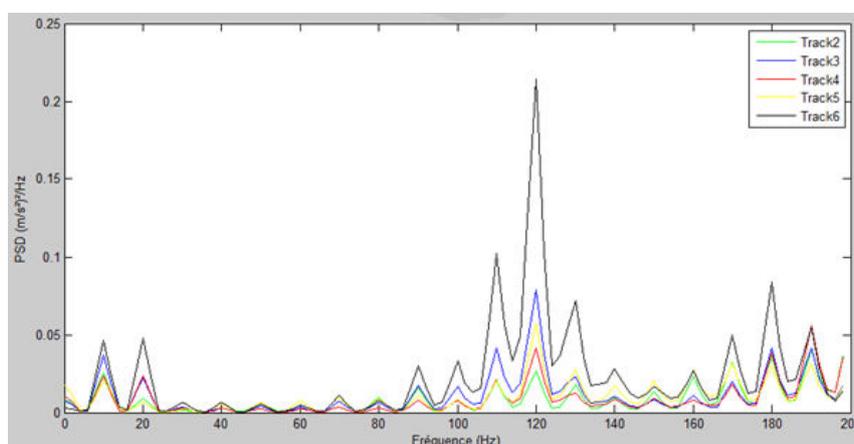


Fig. 2. Signaux des cinq accéléromètres à 10 Hz (voie 2, 3, 4, 5 et 6)

2.2 TYPOLOGIE ET CONFIGURATIONS DE DÉFAUTS

Plusieurs expériences ont été réalisées avec différentes configurations de défaut créés sur l'engrenage et sur le roulement, qui sont présentées sur le tableau 2.

Tableau 2. Configurations de défauts expérimentées

Configuration de défaut	Défaut de Roulement Type 16101-ZZ			Défaut d'Engrenage		
	Sain	Bague extérieure 	Bague intérieure (sur le chemin, faible défaut)	Cage/bielle 	Sain	1 dent cassée 
Config. 1 : Roulement sain (Rs)	✓					
Config. 2 : Roulement sain et engrenage sain (Rs_Es)	✓				✓	
Config. 3 : Roulement sain et Engrenage défectueux (Rs_Ed)	✓					✓
Config. 4 : Roulement bague extérieure défectueuse (R_bext)		✓				
Config. 5 : Roulement bague extérieure défectueuse et Engrenage sain (R_bext_Es)		✓			✓	
Config. 6 : Roulement bague extérieure défectueuse et Engrenage défectueux (R_bext_Ed)		✓				✓
Config. 7 : Roulement bague intérieure défectueuse (R_bint)			✓			
Config. 8 : Roulement bague intérieure défectueuse et Engrenage sain (R_bint_Es)			✓		✓	
Config. 9 : Roulement bague intérieure défectueuse et Engrenage défectueux (R_bint_Ed)			✓			✓
Config. 10 : Roulement cage défectueuse (R_cage)				✓		
Config. 11 : Roulement cage défectueuse et Engrenage sain (R_cage_Es)				✓	✓	
Config. 12 : Roulement cage défectueuse et Engrenage défectueux (R_cage_Ed)				✓		✓

3 METHODE D'ANALYSE ETUDIEE

Dans ce document, nous nous focalisons sur l'analyse temporelle des signaux de vibrations, qui est une méthode d'analyse des signaux stationnaires dans le domaine temporel pour détecter la présence des défauts et le cas échéant leur gravité dans les machines tournantes. On utilise à cet effet des indicateurs scalaires quantitatifs pour décider si oui ou non la machine présente un défaut. Les indicateurs scalaires utilisés, que nous exploitons et comparons pour la détection dans ce travail sont la RMS, le kurtosis, le facteur de crête, le facteur crête à crête et le facteur K présentés ci-dessous.

3.1 LA VALEUR EFFICACE DE L'ACCELERATION

La valeur efficace, RMS (RootMean Square) est la valeur moyenne quadratique qui peut être calculé grâce à l'équation 1. Elle permet de caractériser la dispersion des valeurs par rapport à la moyenne. En surveillance vibratoire, les vibrations sont néfastes lorsqu'il y a des variations brusques du signal de la courbe de RMS.

$$\text{RMS} = \text{Acc}_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i)^2} \quad (1)$$

Où x_i est l'amplitude des vibrations

3.2 LE KURTOSIS

Le kurtosis (k) est le moment d'ordre quatre de mesure statistique d'une distribution (équation 2). C'est un paramètre permettant d'évaluer l'aplatissement de la loi de probabilité par rapport à une distribution normale (distribution d'amplitude gaussienne). Le kurtosis d'une distribution normale est égal à 3 et d'une distribution des valeurs non aberrantes est supérieur à 3. C'est un indicateur très utilisé pour détecter la présence des signaux impulsions périodiques typiques d'un choc anormal.

$$k = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4} \quad (2)$$

Où \bar{x} est la moyenne de l'amplitude des vibrations, σ l'écart-type.

3.3 FACTEUR DE CRETE

Le facteur de crête (FC) très utilisé pour la détection des défauts de roulements, caractérise la durée de vie de roulements. Si le facteur crête augmente, on est en situation non alarmante. Si au contraire il diminue, alors cela veut dire que le roulement est en fin de vie. Il est égal au quotient de l'accélération crête par l'accélération efficace.

$$FC = \frac{Acc_{crête}}{Acc_{eff}} \quad (3)$$

3.4 FACTEUR CRETE A CRETE

Le facteur crête à crête (FCC) est donné par la différence entre la valeur maximale du signal de vibrations et sa valeur minimale.

$$Fcc = Acc_{max} - Acc_{min} \quad (4)$$

3.5 FACTEUR K

Un autre indicateur spécifique aux roulements étudié est le facteur K, qui permet de renseigner sur l'état du roulement. Il se calcule par le produit de l'accélération crête par l'accélération efficace (équation 5).

$$K = Acc_{crête} * Acc_{eff} \quad (5)$$

En théorie, le roulement se dégrade lorsque K devient grand. Entre K = 0.01 g à 0.8 g, le roulement est encore en bon état, au-delà de 8 g le roulement est en fin de vie.

4 RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'analyse temporelle a été étudiée notamment en exploitant les indicateurs scalaires. Nous avons choisi de comparer sur plusieurs signaux, quelques indicateurs pertinents en vue d'évaluer leur capacité de détection de défaut et sa gravité en fonction du type de défaut. Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'analyse temporelle permet de mettre en évidence la présence de défaut dans les machines. Plusieurs paramètres peuvent influencer les indicateurs et sont présentés sur les sections suivantes.

4.1 INFLUENCE DU TYPE DE DEFAUT ET DE LA VITESSE SUR LES INDICATEURS

L'exploitation des résultats de mesure a été faite sur Matlab®. Les résultats sont présentés et classés par groupe de défauts sur les figures 4, 5, 6 et 7. Le groupe I est composé des configurations de défauts simples de roulement, le groupe II est constitué des défauts multiples de roulement et engrenage sain, en fin le groupe III est constitué des défauts multiples de roulement et engrenage défectueux. Les résultats montrent que le kurtosis est plus sensible aux chocs engendrés par le défaut d'engrenage que par le défaut de roulement. Lorsque l'engrenage est sain, sa valeur varie peu par rapport aux configurations de défauts de roulement sans engrènement (cf. fig. 3, à droite). Le kurtosis n'est pas un indicateur efficace pour comparer la gravité d'un défaut de roulement par rapport à un autre défaut de roulement dans un même groupe de configuration de défauts et cela

pour différentes vitesses testées. Sa valeur reste sensiblement la même pour tous les défauts de roulement lorsque l'engrenage est sain.

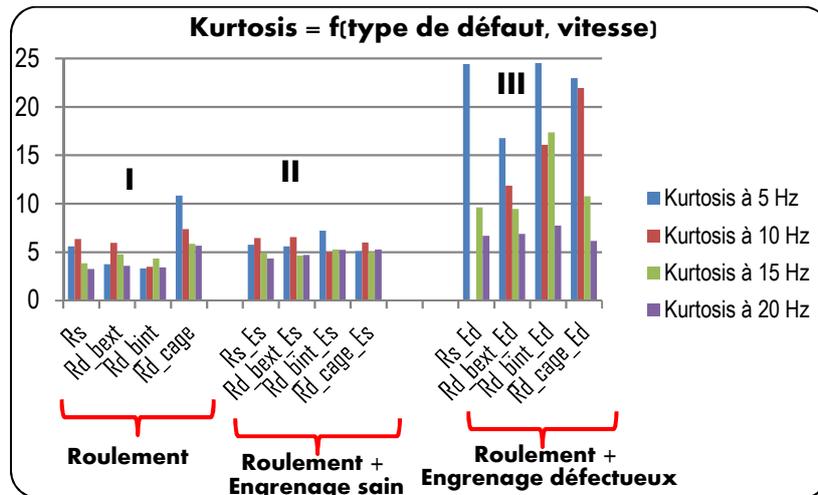


Fig. 3. Influence du défaut et de la vitesse sur le Kurtosis (Sans charge)

Autres indicateurs calculés sont la valeur efficace (RMS) de l'accélération, le facteur de crête (FC) et le facteur crête à crête (FCC). Les résultats de ces indicateurs montrent que le défaut d'engrenage entraîne plus de chocs que les défauts sur le roulement, leurs valeurs ont augmenté en présence d'engrenage défectueux (cf. fig. 4, 5 et 6). À l'instar du kurtosis, ces indicateurs ne sont pas en mesure de mettre en évidence la gravité d'un type de défaut de roulement par rapport à un autre dans un même groupe de configuration de défauts. On n'est donc pas capable de dire si le défaut de bague extérieure, ou de bague intérieure, ou de la cage est plus nuisible à l'état du roulement que d'autres. Sa valeur présente peu de différence dans les différentes configurations de défaut de roulement.

L'analyse a montré que la RMS n'est pas sensible aux défauts de roulement pour les vitesses essayées. Le facteur crête à crête en revanche, n'est sensible seulement qu'au défaut de cage. Les deux indicateurs (RMS et FCC) détectent l'engrènement. Leurs valeurs ont varié de façon significative dans le cas où il y a un engrènement de pignon avec la roue (figure 4 et figure 6).

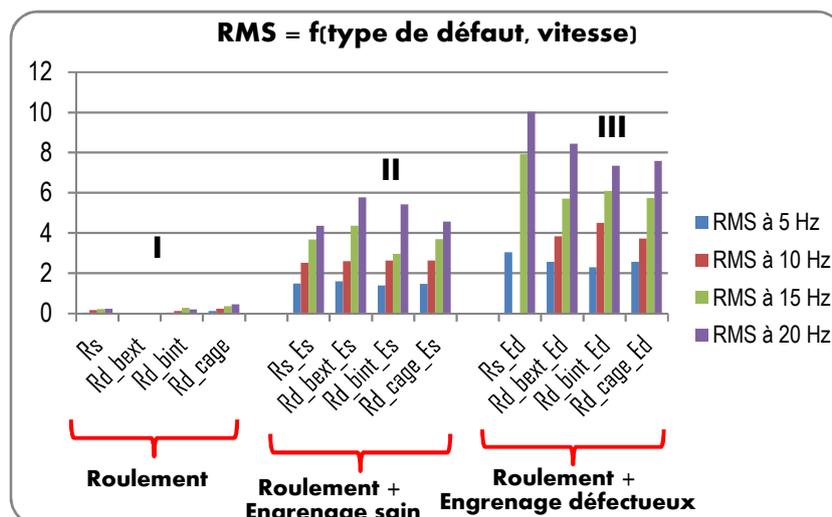


Fig. 4. Influence du défaut et de la vitesse sur le RMS (Sans charge)

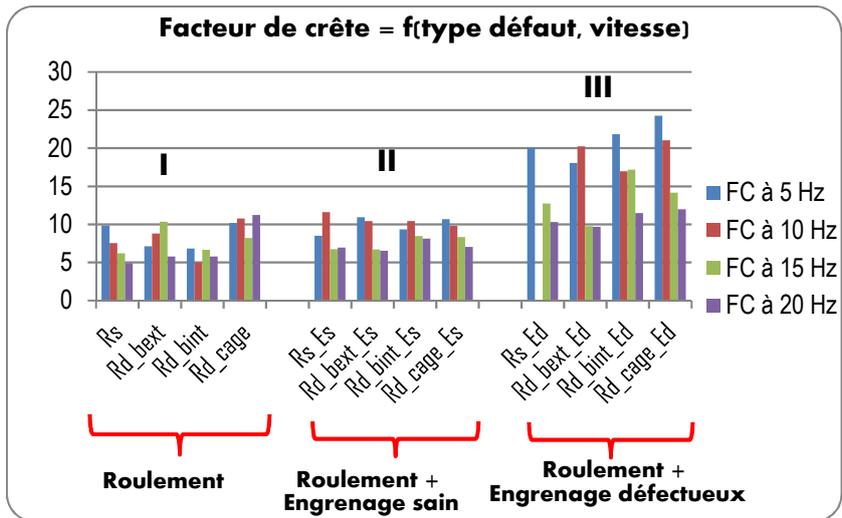


Fig. 5. Influence du défaut et de la vitesse sur le FC (sans charge)

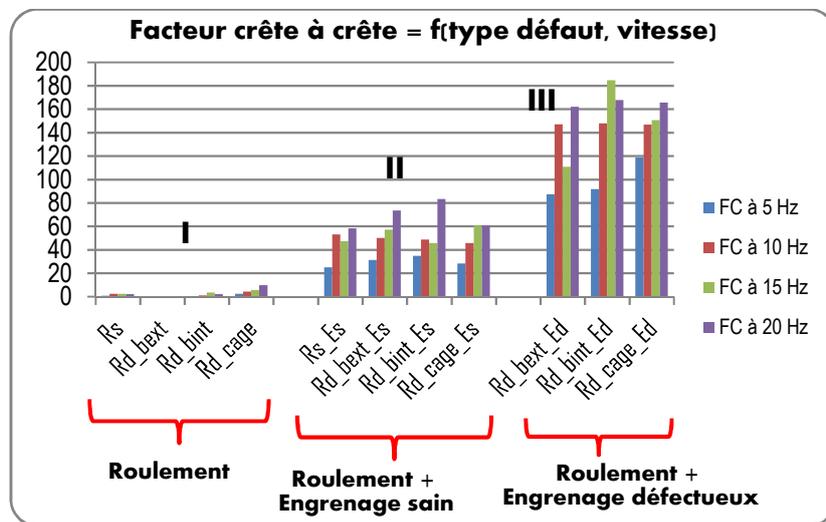


Fig. 6. Influence du défaut et de la vitesse sur le FCC (sans charge)

L'indicateur de gravité de défaut du roulement n'est donc aucun de ces indicateurs présentés sur les figures 4, 5 et 6. Il convient alors de trouver un autre indicateur pour suivre l'évolution de la gravité de l'état du roulement.

4.2. FACTEUR K - INFLUENCE DE LA VITESSE

Les indicateurs précédents ne renseignent pas sur la gravité de défaut du roulement. L'indicateur permettant de renseigner sur l'état du roulement est le facteur K donné précédemment en équation 5. En comparant les différents défauts de roulements essayés à différentes vitesses sur la figure 7, il apparaît clairement que le défaut de cage dont l'effet n'est pas visible sur les indicateurs précédents est bien celui qui affecte le plus l'état du roulement quel que soit la vitesse essayée. Bien que visuellement si on regarde les défauts créés sur les roulements (cf. tableau 2), on a tendance à dire que c'est le défaut de bague extérieure qui est plus grave que celui de la cage et de la bague intérieure nettement plus petit. Cela est dû sûrement au fait que la cage est tournante et la bague extérieure fixe. La figure 7 présente l'évolution de K en fonction de la vitesse. Plus la vitesse augmente, plus K devient important et ainsi le défaut de cage apparaît nettement comme le plus nuisible.

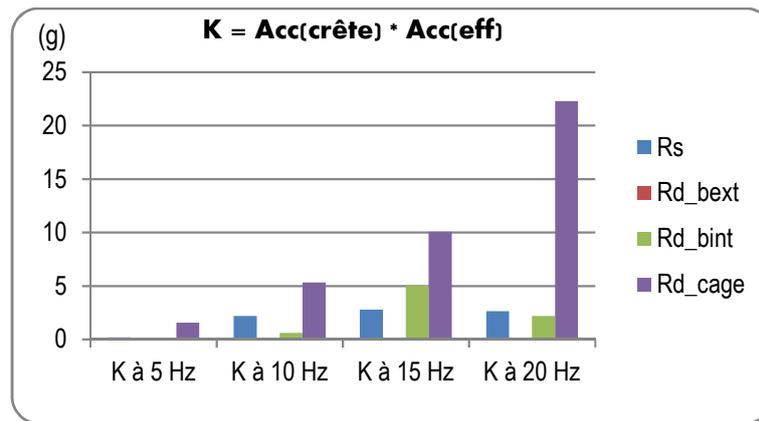


Fig. 7. Influence de la vitesse sur le facteur K

4.3. INFLUENCE DE LA CHARGE SUR LES INDICATEURS

Le chargement d'engrenage permet d'atténuer et de stabiliser les vibrations. La figure 8 montre l'influence de la charge sur le kurtosis (a), sur le facteur de crête (b), sur la RMS (c) et sur le facteur crête à crête (d). Théoriquement, si le facteur de crête diminue la situation est alarmante. On montre là que quand la charge augmente, le FC diminue et ainsi on détecte mieux le défaut de roulement. Le kurtosis diminue mais reste toujours supérieur à trois même lorsque les vibrations sont stabilisées en présence de la charge. La RMS et le FCC qui sont intrinsèquement liés à la dispersion ont augmenté (présence de défauts) lorsque l'engrenage est chargé. Cela prouve qu'on détecte mieux les défauts avec les indicateurs lorsque les engrenages sont chargés. La figure 8 montre l'évolution des indicateurs en fonction de la charge dans le cas des essais dans la configuration « Roulement cage défectueuse + Engrenage sain ».

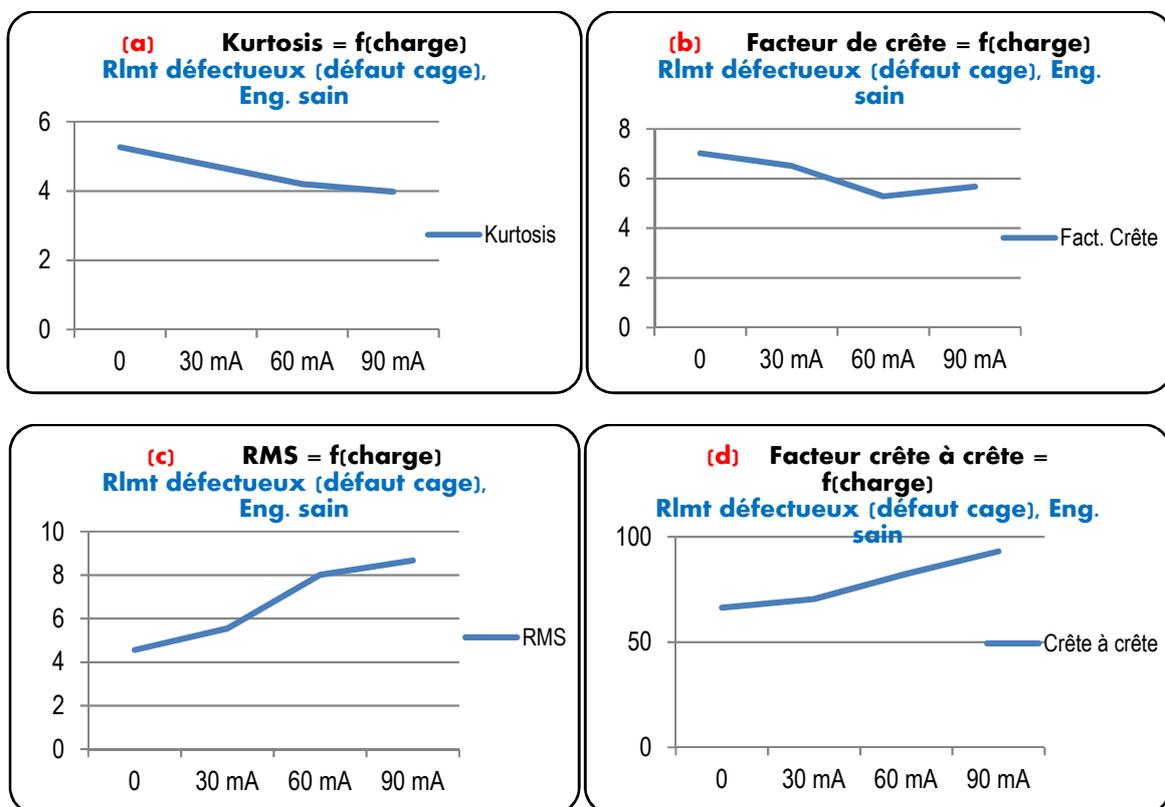


Fig. 8. Influence de la charge sur le Kurtosis, RMS, FC et FCC

4.4. COMPARAISON DES CRITERES

L'exploitation des résultats de mesures de l'analyse temporelle a fourni des résultats qui confirment l'utilisation des indicateurs scalaires comme outils de détection de défaut applicables aux signaux vibratoires de machines tournantes. Toutefois, tous les indicateurs ne fournissent pas le même résultat en fonction de la configuration de défauts. Le résultat montre qu'un défaut de cage aurait plus d'impact sur l'état du roulement que des défauts sur la bague extérieure ou sur la bague intérieure. Les différents indicateurs étudiés sont comparés sur leur capacité à détecter et présentés sur le tableau 3.

Tableau 3. Récapitulatif des résultats de l'analyse

Configuration de défaut	Indicateur				
	Kurtosis	RMS	Facteur de crête	Facteur crête à crête	Indicateur K
Capacité à détecter l'engrènement sain	☒	☑	☒	☑	Sans engrenage
Capacité à détecter le défaut d'engrenage	☑	☑	☑	☑	Sans engrenage
Capacité à détecter la gravité d'un défaut de roulement	☒	☒	☒	☒	☑
Capacité à détecter un défaut simple	☑	☑	☑	☑	☑
Capacité à détecter des défauts multiples	☑	☑	☑	☑	Sans engrenage

5 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons évalué différents indicateurs scalaires en vue d'identifier la capacité de chacun à détecter un type de défaut concerné ou la gravité d'un défaut sur le roulement. Plusieurs expérimentations à différentes vitesses et à différentes charge ont été réalisées. Les résultats montrent que seul le facteur K permet de suivre l'évolution de la gravité du défaut de roulement, et permet de comparer la gravité d'un défaut de roulement par rapport à un autre défaut de roulement dans une configuration, soit avec l'engrenage sain, soit avec l'engrenage défectueux.

REFERENCES

- [1] Zezz R. Chaib, S. Meziani, I. Verzea, Surveillance des roulements par analyse vibratoire, *Sciences & Technologie B – N°21*, Juin (2004), pp. 23-27.
- [2] Wärsilä, Lubricating oils for WÄRTSILÄ® 32, and 32GD engines, DATA & SPECIFICATIONS, Technical Services, Issue 7, 02 March 2016
- [3] R. Younes, N. Ouelaa, N. Hamzaoui, Optimisation d'indicateurs de défauts combinés d'engrenages et de roulements par la perception sonore, 22^{ème} Congrès Français de Mécanique Lyon, 24 au 28 Août 2015
- [4] N. Hamzaoui, R. Younes, N. Ouelaa, Indicators of real gear transmission defects using sound perception, NOVEM 2015 Noise and vibration, Dubrovnik- Croatia, April 13-15 2015
- [5] A. Djebala, N. Ouelaa, C. Benchaabane and D. F. Laefer, Application of the wavelet Multirésolution Analysis and Hilbert transform for the prediction of gear tooth defects, *Meccanica*, DOI: 10.1007/s11012-012-9538-1, 2012
- [6] A. Djebala, N. Ouelaa, N. Hamzaoui and L. Chaabi, Detecting mechanical failures inducing periodical shocks by wavelet multirésolution analysis. Application to rolling bearings faults diagnosis, ISSN 1392-1207. *MECHANIKA*, 2006. Nr. 2(58)
- [7] A. Djebala, Habilitation universitaire en Génie Mécanique, Université 08 Mai 1945 Guelma, Mai 2012
- [8] J. Antoni, M. Sidahmed, Contrôle et diagnostic à partir des signaux acoustiques et vibratoires, *Acoustique & Techniques* n° 38, Spécial congrès Surveillance 5
- [9] D. Abboud, Vibration-based condition monitoring of rotating machines in non stationary regime, Thesis INSA Lyon, 2015
- [10] J. Antonia, R. B. Randall, The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines, *Mechanical Systems and Signal Processing* vol. 20, pp. 308–331, 2006
- [11] G. Lejeune, J. L. Lacoume, P. Marchand, M. Durnerin, N. Martin, J. Liénard, A. Silvent CEPHAG, Cyclostationnarités d'ordre 1 et 2 : application à des signaux vibratoires d'engrenages, Seizième Colloque GRETSI, 15-19 Septembre 1997, Grenoble
- [12] M. El Badaoui, F. Guillet, N. Nejjar, P. Martini et J. Danière, "Diagnostic d'un train d'engrenages par analyse cepstrale synchrone", Seizième Colloque GRETSI, 15-19 Septembre 1997, Grenoble
- [13] A. Djebala, N. Ouelaa et N. Hamzaoui, Optimisation de l'analyse multirésolution en ondelettes des signaux de choc. Application aux signaux engendrés par des roulements défectueux, *Mécanique & Industries* 8, 379-389, © AFM, EDP Sciences 2007, DOI : 10.1051/meca:2007060
- [14] Harris, Fredric J. "On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform." *Proceedings of the IEEE*®. Vol. 66, January 1978, pp. 51–83.