

Effet de la circularité des bagues sur le comportement vibratoire du roulement / Extended abstract Impact of low ring waviness orders on Hybrid ball bearing under high speeds

S. Berrada^{1,2,3}, R. Serra^{2,3}, P.L. Dalen⁴, C. Chastagner¹

¹SKF France, Saint Cyr sur Loire,

²Institut National des Sciences Appliquées Centre Val de Loire, Blois France,

³Laboratoire de Mécanique Gabriel Lamé - EA 7494, Blois, France,

⁴SKF RTD Netherlands,

salma.berrada@skf.com / Roger.serra@insa-cvl.fr / piet.van.dalen@skf.com /
celine.chastagner@skf.com,

Résumé

Les roulements rigides à billes (DGBB) sont largement utilisés dans les équipements rotatifs dans de nombreux domaines, notamment on les retrouve dans les moteurs de véhicules électriques. Ceux-ci sont très exigeants en termes de bruit et de vibrations. Le design et la géométrie des éléments du roulement, ainsi que le jeu interne, le choix des matériaux des composants et les propriétés du lubrifiant influencent le comportement vibratoire et le cycle de vie du roulement. Dans les machines tournantes, les roulements ont pour fonction principale de réduire les frottements pour permettre une rotation fluide, mais ils sont également source de vibrations en raison de la rotation du set de billes, et ceci même dans le cas d'un roulement théoriquement parfait. Les performances du roulement dépendent fortement de la qualité de la surface de contact entre chemins de bagues et surface des billes. Dans un roulement à billes, la qualité de la surface de contact résulte de plusieurs processus de fabrication (traitement thermique, tournage, rectification, rodage et assemblage) et affecte directement les niveaux de bruit et de vibrations générés par le roulement dans l'application. De plus, les matériaux et la dureté des composants affecteront les forces de contact entre les billes et les chemins des bagues sur les roulements en rotation. Les roulements hybrides sont connus pour leurs performances lorsqu'ils fonctionnent à des vitesses de rotation élevées. Dans cet article, l'effet des ondulations d'ordres bas sur chemin de bagues intérieure et extérieure est étudié sur des roulements hybrides à billes (DGBB). Un modèle numérique ainsi que des tests expérimentaux ont été réalisés pour étudier l'effet de l'ondulation sur chemin de bagues sur le roulement hybride à haute vitesse de rotation.

Abstract

Deep groove ball bearings (DGBBs) have a crucial role in various rotating equipment applications, particularly in high-performance systems such as electric vehicle Powerpacks, where noise and vibration levels are of utmost importance. The roundness and surface shapes of the ring races significantly influence the performance and service life of DGBBs. But the fact remains that in the bearing industry, it is well-known and widely accepted that contact surfaces between bearing components are never perfectly smooth, even with the most advanced grinding and honing processes. Despite manufacturers' efforts to achieve high levels of precision, there are always inherent surface irregularities and deviations on the ring races and ball surfaces that generate vibrations due to uneven ball load distribution. To address this issue, DGBB manufacturers have developed vibration classification systems that help to classify the vibration levels of DGBBs. These classification systems are based on international standards, such as ISO and ANSI, and they provide a standardized way of measuring and classifying the vibration levels of DGBBs.

The vibration classification system for DGBBs is based on the vibration velocity and is measured in the micron scale ($\mu\text{m/s}$), that means that those defects at manufacturing stage still of very small amplitudes and

are in general not harmful under applicative conditions. However, excessive surface irregularities, such as deep scratches, indentations, or waviness orders with high amplitudes, lead to increased friction and localized stresses that affect bearing performance and may result in premature failure. In this article, inner and outer ring low waviness orders are studied on Hybrid Deep Groove Ball Bearings (DGBB). Both numerical model and, experimental tests were carried out to study the effect of rings waviness on hybrid bearing under high rotation speed.

Key words

Hybrid ball bearing, bearing dynamics, ceramic ball, waviness, vibration, deep groove ball bearing, high speed applications, dynamics of ball bearings, Bearing frequencies, inner ring waviness, low order waviness.

1 Introduction

Les roulements rigides à billes (DGBB) jouent un rôle crucial dans diverses applications d'équipements tournants, notamment dans des systèmes haute performance tels que les moteurs de véhicules électriques, où les niveaux de bruit et de vibrations sont d'une importance capitale. La circularité et la forme des surfaces des chemins de roulement influencent considérablement les performances et la durée de vie des roulements. La circularité de la surface du chemin des bagues fait référence au degré de déviation par rapport au cercle parfait [1,2]. Cependant, il est connu et largement accepté dans l'industrie des roulements que les surfaces de contact entre les composants des roulements ne sont jamais parfaitement lisses, même avec les processus de rectification et de rodage les plus avancés. Malgré les efforts des fabricants pour atteindre des niveaux de précision élevés, il existe toujours des irrégularités et des écarts de surface sur les chemins de roulement et les surfaces des billes qui génèrent des vibrations en raison d'une répartition inégale de la charge des billes. Cependant, des irrégularités de surface excessives, telles que des rayures profondes, des indentations ou des ondulations avec de fortes amplitudes, entraînent une augmentation du frottement et des contraintes localisées qui affectent les performances du roulement et peuvent entraîner une défaillance prématurée. Pour remédier à ce problème, les fabricants de roulements ont développé des systèmes de classification des vibrations qui aident à classer les niveaux de vibration des roulements. Ces systèmes de classification sont basés sur des normes internationales telles que l'ISO et l'ANSI, et ils fournissent une méthode normalisée de mesure et de classification des niveaux de vibration des DGBB.

Le système de classification des vibrations pour les DGBB est mesuré en vitesse vibratoire et est mesuré à l'échelle du micron ($\mu\text{m/s}$), ce qui signifie que les défauts au stade de la fabrication présentent des amplitudes assez faibles et ne sont généralement pas nuisibles dans des conditions d'utilisation applicative. Bien que les fabricants s'efforcent de minimiser les défauts de surface indésirables grâce à des processus de fabrication précis et des mesures de contrôle qualité, il reste essentiel de comprendre la réponse aux vibrations du roulement dans des conditions applicatives spécifiques telles que la lubrification, la charge, la vitesse et la température, afin d'assurer des roulements plus fiables avec des niveaux de vibrations adaptés aux besoins de l'application.

De nombreuses études de recherche ont étudié l'impact des ondulations ou des irrégularités des chemins de bagues intérieur et extérieur sur le comportement vibratoire des roulements depuis les années 1960, avec l'apparition des premières machines de contrôle vibratoire chez SKF. O. Gustafsson, T. Tallian et al. (1963) ont analysé l'impact des ondulations du chemin de roulement extérieur sur le niveau de vibration du roulement, qui se manifeste principalement à la fréquence de passage de billes [3]. O. Gustafsson et T. Tallian (1963) ont étudié la relation entre le niveau de vibration sur des plages de fréquences spécifiques, en tenant compte de conditions de vitesse et de charge normalisées, et le niveau d'ondulation sur les chemins de roulement ou sur les surfaces de billes [4]. E. Yhland (1967) a étudié les vibrations des roulements à rouleaux dans la direction radiale induites par des imperfections sur l'état de surface des composants en sortie de production [5,6]. E. Yhland (1967) et T. Harris (1991) ont étudié les modes de vibration du roulement excités par des défauts ondulatoires sur les chemins de bagues [6,7]. F. Wardle (1988) a comparé

des mesures de vibration expérimentales et théoriques en tenant compte d'un roulement à une rangée de billes [8]. E. Yhland (1992) a présenté un modèle linéaire pour étudier les vibrations de l'arbre dues aux imperfections du roulement, mais en tenant compte de faibles et moyennes vitesses et en supposant que les forces centrifuges de l'ensemble de billes sont négligées [9]. N. Akturk (1999) a étudié la réponse vibratoire numérique d'un arbre en tenant compte de l'effet des ondulations sur différents composants du roulement [10]. Ensuite, de nombreuses études entre 2000 et 2020 se sont concentrées sur le développement de modèles numériques non linéaires en tenant compte des variations des forces de contact dans le temps, et en tenant compte des ondulations sur les surfaces de contact des composants des roulements à billes et à rouleaux [11,12,14,15,16,17]. Le présent article traite l'effet des ondulations basses fréquence sur les chemins de bagues intérieures et extérieures, par exemple la forme ovale et triangulaire du chemin de bague interne. Des études théoriques et expérimentales ont été réalisées en tenant compte d'un roulement à billes hybride avec différents niveaux d'ondulations d'ordre 2 et 3 sur le chemin de bague intérieur sous différentes conditions de vitesse, afin d'étudier l'impact sur le comportement vibratoire du roulement dans des conditions applicatives.

2 Dynamique des roulements et calcul théorique

2.1 Vibrations induites

Les vibrations induites par les roulements sont dues aux caractéristiques intrinsèques de conception des roulements, telles que le jeu interne, les propriétés des matériaux de composants, le nombre et la taille des billes, La forme des pistes de roulement, le type et le matériau de la cage, etc. De plus, les imperfections géométriques et les irrégularités telles que les ondulations et les défauts sur les surfaces de contact des composants du roulement affectent ces vibrations. La conformité des surfaces des composants du roulement (ondulations, courbure, rugosité, etc.) joue un rôle crucial dans le comportement vibratoire du roulement. Sous des conditions d'application ou de test, les roulements sont toujours soumis à des charges axiales et/ou radiales, et comme les surfaces de contact ont toujours des imperfections, la bague extérieure se déforme sous la répartition non uniforme de la charge et des contraintes, ce qui génère des vibrations sur le roulement (figure 1). La gravité de ces vibrations dépendra de nombreux facteurs, parmi lesquels on cite la typologie des défauts, l'amplitude et l'ordre des ondulations, ainsi que la rigidité des contacts dans le roulement et les conditions de fonctionnement. [18]

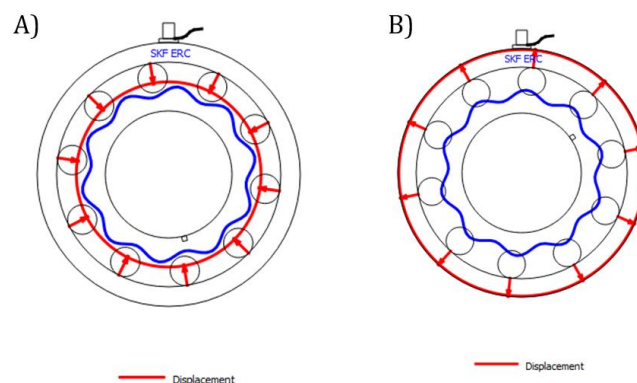


Figure 1 : Déformation de la bague extérieure sous l'effet d'excitations paramétriques

Dans cet article, une grande attention sera portée sur l'effet des ondulations à faibles ordres sur le comportement vibratoire des roulements à billes. En particulier, il sera question de l'impact de l'ondulation d'ordre 2 en considérant les roulements hybrides.

2.2 Effet de l'ondulation d'ordre bas sur chemin de bagues ainsi que du choix de matériau de billes sur le comportement vibratoire du roulement

L'ondulation fait référence aux imperfections géométriques sur les pistes de bagues ainsi que sur les surfaces des billes, principalement causées pendant le processus de fabrication des roulements. En comprenant ces sources de vibrations, la performance, la fiabilité et la durée de vie du roulement peuvent être améliorées.

Ces écarts peuvent être mathématiquement représentés comme une somme de fonctions sinusoïdales. Chaque fonction a sa propre fréquence et amplitude. Cette représentation permet d'analyser l'effet de l'ondulation en tant que phénomène périodique, en supposant une variation harmonique des forces de contact dans le temps. Dans cette étude, nous nous concentrerons sur les faibles ordres d'ondulation comme l'ordre 2, 3 et 4.

Les faibles ordres d'ondulation sur la bague intérieure impliquent un nombre réduit de déviations par circonférence, ce qui entraîne des intervalles plus longs entre les déviations successives et potentiellement des variations plus régulières des forces de contact par rapport aux ordres d'ondulation élevés comme c'est le cas en cas de rugosité de surface. Cependant, cela peut limiter la capacité à résoudre des problèmes dynamiques spécifiques liés à l'ondulation dans des applications particulières. D'autre part, la sévérité des vibrations dépend fortement de l'amplitude de l'ondulation, mais aussi de la rigidité du contact. Lorsqu'on considère les roulements hybrides, les billes en céramique ont une rigidité supérieure et une déformation élastique réduite, ce qui peut améliorer la stabilité des roulements avec peu de variations grâce à la rigidité de contact, entraînant ainsi une génération de bruit et de vibrations plus faible comparé aux roulements à billes en acier. Cependant, en raison de la nature cassante des billes en céramique, l'ondulation (en fonction de sa gravité) peut augmenter le risque de concentration de contraintes et potentiellement conduire à une défaillance au niveau des billes, plus spécifiquement en prenant en considération les conditions de charges et de contamination élevées en application.

Il est connu que les faibles ordres d'ondulation sur la bague intérieure génèrent des vibrations qui se manifeste au niveau des harmoniques de la vitesse de rotation. Ce phénomène est caractéristique des faibles ordres, comme c'est le cas pour une forme ovale sur la bague intérieure. Celle-ci montrera un pic à 2 fois la fréquence de rotation dans le spectre FFT, figures 2 et 3.

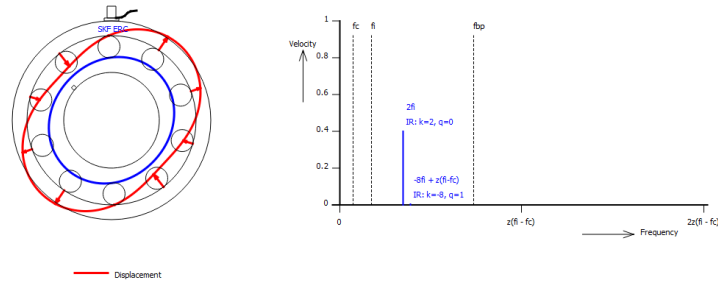


Figure 2: Effet de l'ondulation d'ordre 2 sur le spectre de fréquence

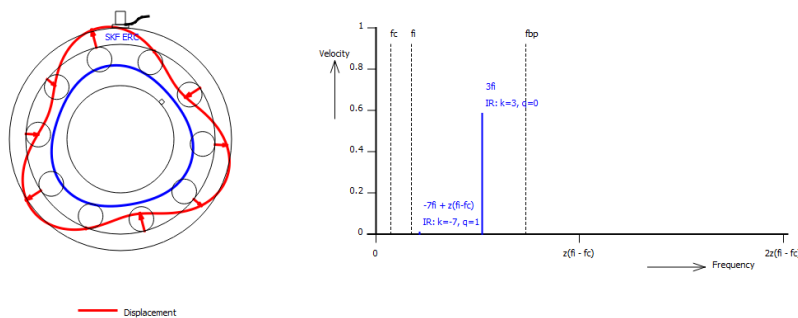


Figure 3: Effet de l'ondulation d'ordre 3 sur le spectre de fréquence

3 Méthodologie d'essais

Des expériences ont été réalisées sur un DGBB hybride commercial. La circularité de la bague intérieure a été mesurée sur 5 bagues à l'aide d'un appareil de mesure de circularité SKF avec une résolution de 0,01 μm . les déviations de forme étudiées dans cet article relèvent de l'ordre du micron, comme cité précédemment.

Les roulements numéros 3, 20 et 21 présentent différents ordres de faible ondulation (2, 3 et 4) à différentes sévérités, comme indiqué sur la Figure 3.

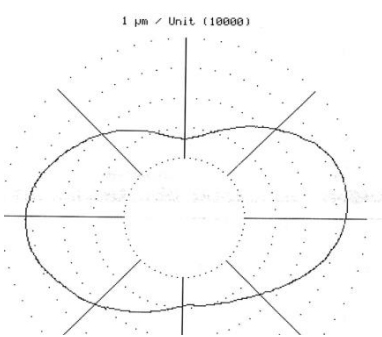
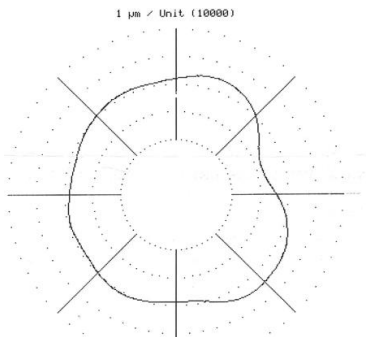
Le roulement 3 présente un ordre 2 et 4 avec des amplitudes élevées, les roulements 20 et 21 présentent des ordres 3 et 4 avec amplitudes élevées. Les roulements 29 et 31 sont utilisés comme référence car ils ne présentent pas de valeurs d'ondulation particulières avec amplitude élevées.

Les roulements ont été montés après la mesure de la circularité des composants et testés sur une machine de contrôle vibratoire SKF selon la norme ISO d'essai de vibration des roulements à billes, sous une charge axiale appliquée sur la bague extérieure et une vitesse de rotation stationnaire [22].

Ensuite, les roulements ont été montés sous conditions applicatives en tenant compte de 2 conditions d'essais:

- Conditions de charge et vitesse stationnaire,
- Conditions de vitesse variable et charge stationnaire,

Dans une étude précédente, il a été montré que la première vitesse critique en conditions applicatives est supérieure aux conditions de fonctionnement supposées [23].

Ondulation	Oval	Triangulaire	rectangulaire	
Roulement 3	4.87 μm	0.65 μm	0.28 μm	
Roulement 20	1.03 μm	1.05 μm	0.76 μm	

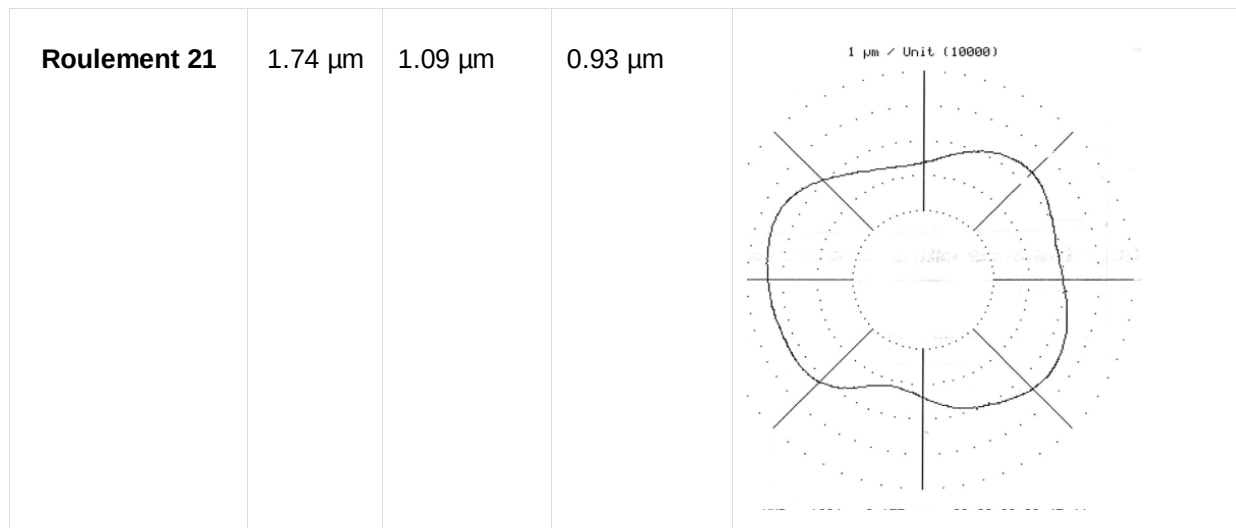


Figure 4: profile de bagues avec ordres d'ondulations testés

4 Résultats et discussion

Dans des conditions d'essai standard de vibration, en tenant compte de la charge axiale sur la bague extérieure et de la vitesse stationnaire de 1800 tours par minute (RPM), nos résultats expérimentaux ont montré une corrélation claire entre une ondulation d'ordre inférieur sur la piste de la bague intérieure et le niveau de vibration du roulement monté. Avec l'augmentation de la forme ovale, le niveau de vibration à 2 fois la vitesse de rotation a augmenté. Nous avons observé les niveaux de vibration les plus élevés avec un pic à la fréquence de 2 fois la vitesse de rotation dans le spectre FFT avec un niveau élevé dépassant $140 \mu\text{m/s}$ pour le roulement n°3, puis respectivement le signal FFT montre le pic à 2 fois la vitesse de rotation pour le roulement 21 en deuxième lieu et le roulement 20 en troisième lieu. Ensuite, les roulements présentant des amplitudes d'ondulation très faibles, 31 et 29, montrent une faible vibration à 2 fois la vitesse de rotation avec des valeurs n'excédant pas $40 \mu\text{m/s}$, comme le montre la figure 5.

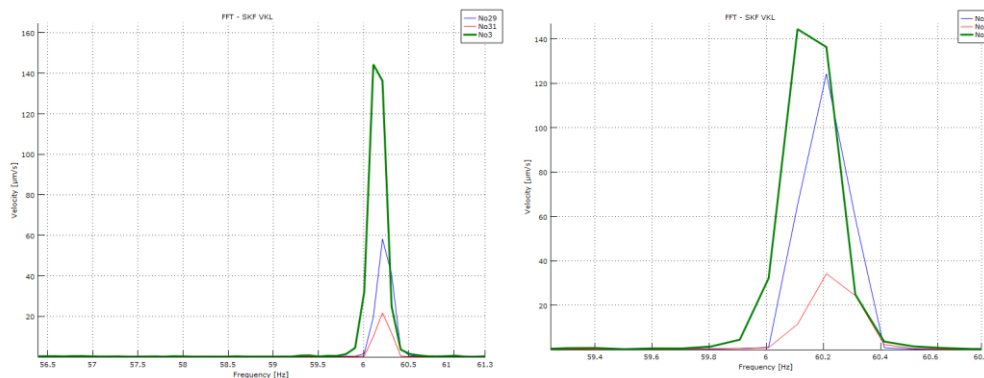


Figure 5: Spectre de fréquences des 5 roulements avec un zoom sur l'harmonique 2 xRPM

Les spectres FFT des 5 roulements avec un zoom sur 2 fois la vitesse de rotation sont présentés dans la figure 5. On peut clairement observer que les roulements avec une ondulation d'ordre inférieur (roulements 3, 20 et 21) présentent des pics plus élevés à 2 fois la vitesse de rotation par rapport aux roulements avec des amplitudes d'ondulation très faibles (roulements 31 et 29). Cela confirme la corrélation entre l'ondulation d'ordre inférieur sur la piste de la bague intérieure et le niveau de vibration à 2 fois la vitesse de rotation. Les pics de vibration à 2 fois la vitesse de rotation sont nettement plus prononcés et plus élevés pour les roulements avec des amplitudes d'ondulation plus élevées. Cette observation est en accord avec les résultats précédemment discutés.

Un comportement similaire a été observé avec des formes de piste intérieure triangulaire et rectangulaire. Le signal FFT des cinq roulements (figure 6) montre une corrélation claire entre les amplitudes d'ondulation et les harmoniques de vitesse de rotation correspondants. Les roulements avec des amplitudes d'ondulation plus élevées présentent des pics plus prononcés aux harmoniques de vitesse de rotation, tandis que les roulements avec des amplitudes d'ondulation plus faibles ont des pics moins prononcés. Ces résultats confirment que l'ondulation sur la piste intérieure a un impact significatif sur le comportement vibratoire du roulement.

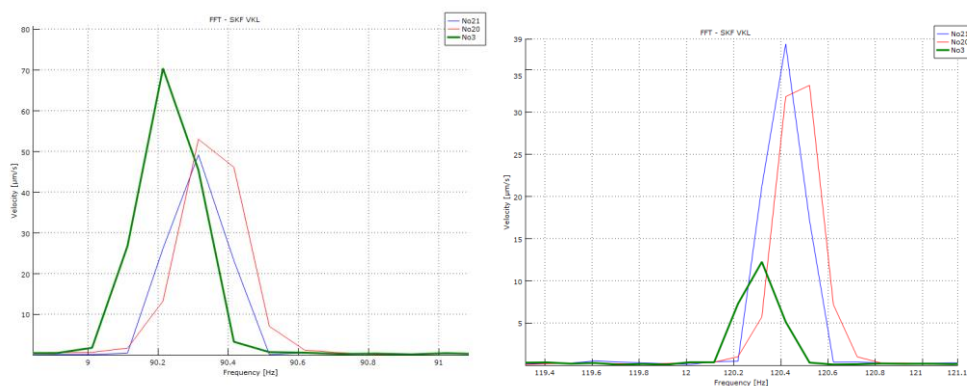


Figure 6: Spectre de fréquences des 5 roulements avec un zoom sur les harmoniques 3 xRPM et 4xRPM

Cependant, compte tenu des conditions applicatives stationnaires de 5 000 tr/min et de charge stationnaire, et vu que le roulement 3 a un ordre d'onde 2 de la bague intérieure relativement plus élevé, on s'attendrait à

observer un pic correspondant à l'ordre 2 dans le spectre de vibration, mais ce n'est clairement pas le cas en comparant l'amplitude de l'harmonique 2 avec les autres roulements testés (figure 7).

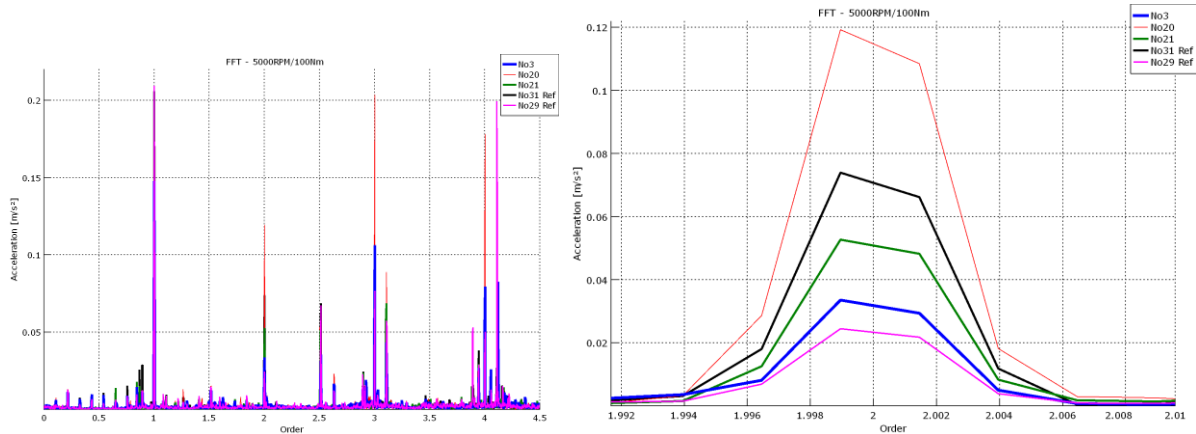


Figure 7: Spectre de fréquences des 5 roulements en condition applicative avec un zoom sur l'harmonique 2xRPM

Aussi les roulements 20 et 21 ont des ordres d'ondulation de la bague intérieure 3 et 4 relativement élevés, les harmoniques de vitesse de rotation du test avec le roulement 20 montrent bien des valeurs relativement élevées, mais ce n'est pas seulement pour les fréquences de vitesse de rotation 3 et 4 fois, mais on voit apparaître plusieurs harmoniques de vitesse de rotation comme indiqué dans la Figure 9. Il est plus probable que ce phénomène ait une autre cause. Pour le roulement 21, l'amplitude d'ordre 3 n'est pas significativement plus élevée par rapport aux autres (figure 8).

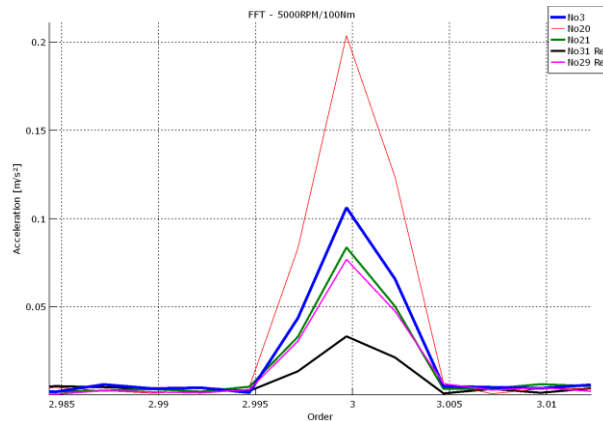


Figure 8: Spectre de fréquences des 5 roulements en condition applicative avec un zoom sur l'harmonique 3xRPM

En comparant l'harmonique 2 du roulement 3 avec ceux des roulements 20 et 31, on peut conclure que l'ovale du chemin de la bague intérieure n'excite pas une résonance du système. Et le roulement 20 ne montre pas de valeurs significativement plus élevées pour les harmoniques 3 et 4. Les amplitudes observées sont légèrement plus élevées, mais cela est probablement dû à autre chose car les harmoniques 2 et 5 ont également des valeurs plus élevées (figure 9)

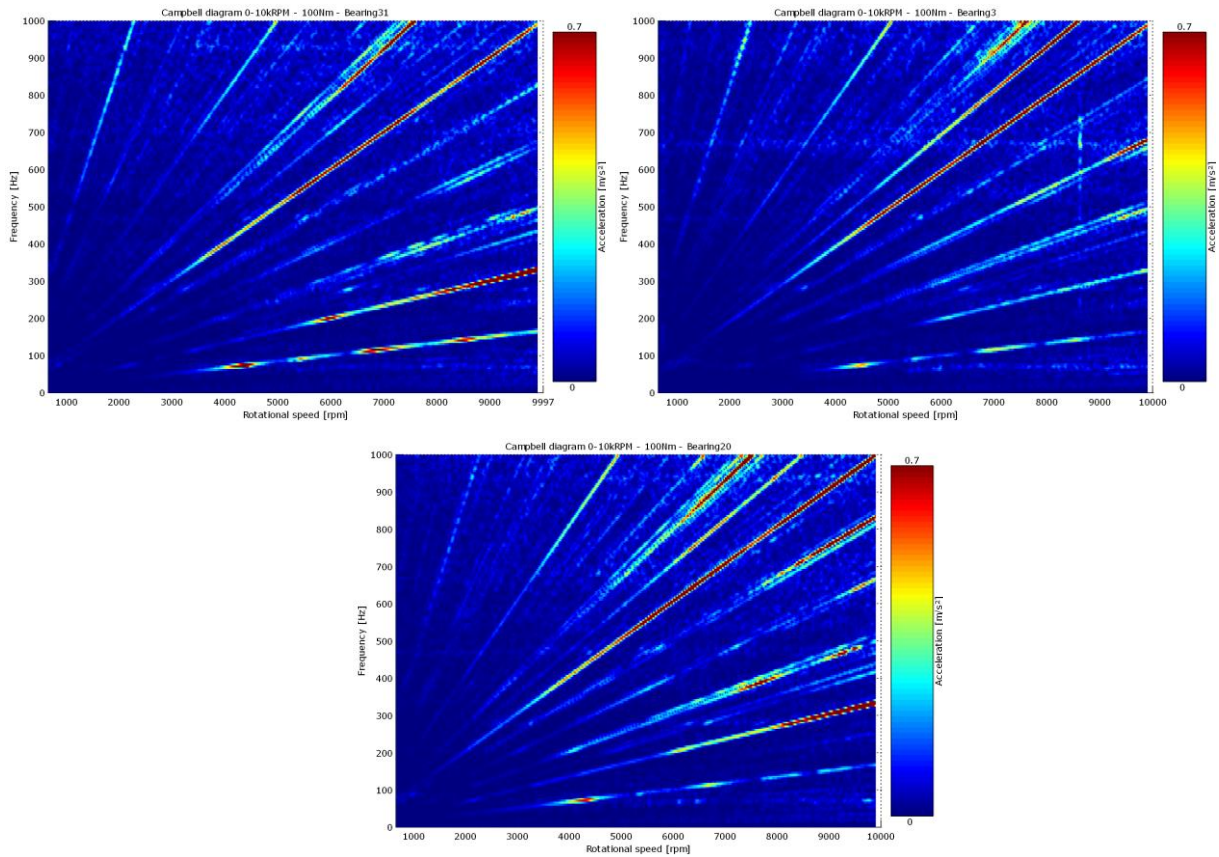


Figure 9: Diagramme de Campbell des roulements 31, 3 et 20 présentant plusieurs harmoniques RPM

5 Conclusion

Les ondulations d'ordre bas se manifestent aux harmoniques de multiples de la vitesse de rotation. En tenant compte des tests expérimentaux réalisés dans cette étude, on peut conclure que les ondulations d'ordre bas sur le chemin de la bague intérieure (ondes 2, 3 et 4) jusqu'à certaines limites d'amplitudes n'engendrent pas des vibrations critiques dans l'application. Cela implique que l'effet des faibles amplitudes d'ondulation sur le chemin de la bague intérieure sur le comportement vibratoire des roulements à billes hybrides dans des conditions de haute vitesse est nettement inférieur à celui que peut engendrer un défaut de balourd ou de désalignement.

Il convient de noter que ces conclusions sont spécifiques au type de roulement testé qui a un grand nombre d'éléments roulants. Une étude de l'effet d'un ordre d'ondulations autour du nombre d'éléments roulants peut donner des résultats différents, car cela pourrait potentiellement entraîner des vibrations plus élevées en raison de phénomènes de résonance.

En résumé, les conclusions suggèrent que les ondulations d'ordre bas, sur le chemin de bague intérieure, dans des limites d'amplitudes spécifiées, n'ont pas d'impact significatif sur le comportement vibratoire des roulements dans l'application testée. Cependant, il est important de prendre en compte les caractéristiques spécifiques du type de roulement et du nombre d'éléments roulants lors de l'évaluation des effets de l'ondulation sur les niveaux de vibration.

References

- [1] Zmarzły, P. Analysis of Technological Heredity in the Production of Rolling Bearing Rings Made of AISI 52100 Steel Based on Waviness Measurements. *Materials* 2022, 15, 3959.

- [2]J.A. Wensing, “On the dynamics of ball bearings”, pp. 99–101, 47–97, 159–162, 16–18, Department of Mechanical Engineering, University of Twente, 1998.
- [3]Tallian T E, Gustafsson O G. Progress in Rolling Bearing Vibration Research and Control. ASLE Transactions, 1965, 8(3): 195-207
- [4]Gustafsson, Olof G. Tallian, Tibor, STUDY OF THE VIBRATION CHARACTERISTICS OF BEARINGS, SKF INDUSTRIES INC PHILADELPHIA PA. Final rept., Apr 1960-Feb 1963
- [5]L. Johansson. Bearing noise in electric motors, Ball Bearing Journal. Vol. 200, PP. 28-31, 1979.
- [6]Yhland, E. Waviness measurement—an instrument for quality control in rolling bearing industry. Proc. Instn Mech. Engrs, 1967, 182, Part 3K, 438.
- [7]Harris, T. E. Rolling bearing analysis, 2nd ed., 1984 (Wiley)
- [8]F. Wardle 1988, Vibration Forces Produced by Waviness of the Rolling Surfaces of Thrust Loaded Ball Bearings Part 2: Experimental Validation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science
- [9]E. Yhland 1992, A Linear Theory of Vibrations Caused by Ball Bearings with Form Errors Operating at Moderate Speed. Journal of Tribology-transactions of The Asme
- [10]N. Aktürk 1999, The Effect of Waviness on Vibrations Associated With Ball Bearings. Journal of Tribology-transactions of The Asme
- [11]S. Harsha, K. Sandeep, R. Prakash, 2004, Non-linear dynamic behaviors of rolling element bearings due to surface waviness. Journal of Sound and Vibration
- [12]G. Jang, S. Jeong 2004, Vibration analysis of a rotating system due to the effect of ball bearing waviness. Journal of Sound and Vibration
- [13]Bai Changqing, Xue Qingyu 2006, Dynamic model of ball bearings with internal clearance and waviness. Journal of Sound and Vibration
- [14]P. K. Kankar, Satish C. Sharma, S. Harsha 2012, Nonlinear Vibration Signature Analysis of a High-Speed Rotor Bearing System Due to Race Imperfection. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics
- [15]D. Petersen, C. Howard, Z. Prime 2015, Varying stiffness, and load distributions in defective ball bearings: Analytical formulation and application to defect size estimation. Journal of Sound and Vibration
- [16]Jing Liu, Y. Shao 2017, Vibration modelling of nonuniform surface waviness in a lubricated roller bearing. Journal of Vibration and Control
- [17]Jing Liu 2020, Vibration analysis of a single row angular contact ball bearing with the coupling errors including the surface roundness and waviness. Science China Technological Sciences
- [18]J. A. Wensing 1998, On the dynamics of ball bearing, PhD thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands
- [19]S. Freiman et J.J. Mecholsky. The Fracture of Brittle Materials. 2011, ed.J. Wiley & Sons, 300 p.
- [20]G.C.Rauch,W.C. Leslie, ‘The extent and nature of the strength-differential effects in steels’, Metal. Trans. 3 (1972) 377-389
- [21]Mian Hammad Nazir, Zulfiqar Ahmad Khan, Adil Saeed, ‘Experimental analysis and modelling of c-crack propagation in silicon nitride ball bearing element under rolling contact fatigue’, Tribology International, Volume 126, 2018, Pages 386-401,
- [22]P. P. Hou, L. Q. Wang & Q. Y. Peng, 2020, ‘Vibration analysis of ball bearing considering waviness under high speed and an axial load’, BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES TECHNICAL SCIENCES, Vol. 68, No. 3,
- [23]S. Berrada, R. Serra, P. Dalen, C. Chastagner, 2021, ‘BEARING FAULT DIAGNOSIS WITH NON-STATIONARY SPEED AND LOAD CONDITIONS’, proceedings of The Seventeenth International Conference on Condition Monitoring and Asset Management – CM 2021