



HAL
open science

DIAGNOSTIC ET PRONOSTIC DE LA MAINTENANCE BASEE SUR LA DEGRADATION : CAS D'UN SYSTEME VIBRATOIRE

I El Adraoui, H Gziri, A Mousrij

► **To cite this version:**

I El Adraoui, H Gziri, A Mousrij. DIAGNOSTIC ET PRONOSTIC DE LA MAINTENANCE BASEE SUR LA DEGRADATION : CAS D'UN SYSTEME VIBRATOIRE. 13^{ème} CONFERENCE INTERNATIONALE DE MODELISATION, OPTIMISATION ET SIMULATION (MOSIM2020), Nov 2020, AGADIR (virtuel), Maroc. hal-03177413

HAL Id: hal-03177413

<https://hal.science/hal-03177413v1>

Submitted on 23 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DIAGNOSTIC ET PRONOSTIC DE LA MAINTENANCE BASEE SUR LA DEGRADATION : CAS D'UN SYSTEME VIBRATOIRE

I. EL ADRAOUI, H. GZIRI, A. MOUSRIJ

Université Hassan I, FST, Départ PSI, Labor IMMII
Settat, Maroc
aimadeladraoui@gmail.com, hgziri@gmail.com,
mousrij@gmail.com

RESUME : *Ce papier traite la présentation d'un dispositif expérimental appelé banc d'essai vibratoire (Moteur, arbre, roue) qui permet de tester, de vérifier et de valider des méthodes liées à l'évaluation, au diagnostic et au pronostic de la santé de phénomène de balourd. L'équilibrage de la roue (disque) est justifié par le fait que la plupart des défaillances des machines tournantes sont liées aux plusieurs défauts parmi lesquels il y'a le balourd. Par conséquent, le système peut être considéré comme critique car leur défaillance diminue d'une manière considérable la disponibilité et la sécurité de la machine, en particulier les éléments tournants à savoir les paliers de guidage.*

L'objectif principal de ce travail est de fournir des données réelles relatives à la dégradation accélérée de la roue (disque) effectuée dans des conditions de fonctionnement variables et/ou constantes, qui sont contrôlées et surveillées en ligne à travers d'un système d'acquisition. Les conditions de fonctionnement sont caractérisées et détectées par un capteur piézo-électrique (accéléromètre).

Enfin, les données de surveillance fournies par le capteur peuvent être utilisées pour un traitement ultérieur afin d'extraire les caractéristiques pertinentes, d'évaluer, de diagnostiquer et de pronostiquer en permanence l'état de santé du système.

MOTS-CLES : *Défaut de balourd, Diagnostic, Pronostic, Maintenance prédictive, banc d'essai vibratoire.*

1 INTRODUCTION

Dans les dernières années, L'analyse vibratoire est devenue une technique prioritaire de la maintenance prévisionnelle particulièrement adaptée aux machines tournantes. Son but en premier est la surveillance de l'état de ces machines au cours de fonctionnement par l'analyse vibratoires des signaux acquis en certains points de mesure préalablement définis. Néanmoins, cette technique relève du domaine de spécialistes vu la spécificité des systèmes à surveiller avec leurs anomalies probables, leurs attentes, leurs exigences de coût et de sécurité, la diversité des moyens de mesure et de traitement, ainsi que la difficulté du diagnostic des spectres mesurés (Semma, EL., et al, Nov. 2014).

Pour contrôler/vérifier les méthodes de diagnostic/pronostic élaborées et publiées dans la littérature, des bancs d'essai dédiés ont été conçus et réalisés par plusieurs centres de recherche et laboratoires à travers le monde selon une grande gamme et variété. La majorité de ces bancs d'essai expérimentaux concernent des composants spécifiques et bien déterminés, tels que des balourds, des roulements, des engrenages, des vérins, des pompes, des pistons, des turbines, etc... Les paragraphes suivants résumant les bancs d'essai et les plates formes didactiques expérimentales qui sont encore publiées :

De nombreuses méthodes de pronostic proposées dans la littérature ont été testées sur la dégradation par l'analyse

vibratoire. Ainsi, dans (Semma, EL., et al, Nov. 2014), les auteurs ont élaboré une démarche de mise en œuvre de la maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire, ensuite ils ont réalisé une enquête auprès d'experts dans le domaine d'analyse vibratoire, a pour objectif de déceler et de hiérarchiser les facteurs clés et les décisions prioritaires à prendre en compte pour réussir un projet d'implantation d'une MCAV. De même, un banc d'essai vibratoire est proposé dans (EL Hannani, A., et al., 2015) pour mesurer et surveiller le niveau de vibration produit par une machine par l'obtention d'un indicateur idéal sur l'état de santé. Dans cette application, les défauts ont été induits au moyen d'une machine tournante à rotor. De plus, dans (Ocak, H., et al., 2007), un banc d'essai dédié a été utilisé pour effectuer des pronostics de défaillance sur les roulements par l'analyse vibratoire de la bague extérieure.

Un banc d'essai lié à une boîte de vitesses et à un pignon a été rapporté dans (Kacprzyński, G., et al., 2004). Dans cette étude, un pignon conique à denture spirale a été amorcé à la fissure et une machine à décharge électrique (EDM) du côté de l'entraînement d'une des dents du pignon pour accélérer d'une manière artificielle la fissuration de la dent. Un grand nombre des accéléromètres ont été placés sur la boîte d'engrenages avec un système de surveillance de la santé et de l'utilisation (HUMS) utilisé pour générer les caractéristiques du comportement vibratoire.

Pour les outils d'usinage, plusieurs de données de fraisage expérimental lié à la fraiseuse universelle pour différentes vitesses, avances et profondeurs de coupe peut être trouvé dans (NSF., I/UCRC, 2012). De même, une plateforme expérimentale a été développée par SIMTech de Singapour (Zhou, J., et al., 2006) pour fournir des données lors du challenge PHM (Pronostics and Health Management) organisé en 2010 par la société PHM. Dans (Ertunc, H. M., and Oysu, C., 2004), les auteurs ont utilisé un banc d'essai expérimental lié aux tests de durée de vie des outils de perçage pour vérifier leur méthode. Les tests ont été effectués sur une machine MAHO 700S, qui est un centre d'usinage (CNC) à cinq axes, avec un mouvement sur trois axes perpendiculaires et une table tournante/inclinable. Enfin, dans (Ren, Q., et al., 2001), un modèle est proposé, développé et validé par suite pour estimer le taux d'usure des outils d'un tour parallèle conventionnel TUD-50 dans une large gamme de conditions de coupe. Ce qui concerne les pompes, une plateforme a été utilisée dans (Peng, Y. and Dong, M., 2011) pour tester la performance d'une méthode développée de modèle semi-markovien caché pour le pronostic de santé des équipements. La plateforme expérimentale consistait en une véritable pompe hydraulique. Pendant les expériences, des tests d'usure à long terme ont été réalisés. Ensuite, trois pompes ont été usées en les faisant fonctionner avec de l'huile non filtrée. Enfin, des tests sur la charge/décharge des batteries Li-Ion sont rapportés dans (NSF., I/UCRC, 2012) les données concernent l'impédance comme critère d'endommagement, toutes les données ont été fournies par le Centre d'excellence pour les pronostics de la NASA.

La synthèse de ces recherches nous a mené à proposer une approche expérimentale de diagnostic/pronostic en se basant sur un banc d'essai vibratoire qui se décline en 4 phases : Phase de motivation, phase de description du dispositif expérimental, phase de Diagnostic/Pronostic dont les résultats sont discutés et phase de conclusion/perspectives.

À la diversité des approches rencontrées dans la littérature, notre démarche propose préalablement, grâce aux études réalisées, une partie supplémentaire qui décrit l'influence du défaut de balourd sur les systèmes tournants. Cette phase sera se baser sur la détection des données, l'interprétation, l'interpolation et la discussion. Elle propose aussi d'évaluer l'état de santé futur avant la défaillance par une régression d'interpolât des données traitées.

2 DIAGNOSTIC ET PRONOSTIC DU SYSTEME

2.1 Motivation

Le contrôle à base d'analyse vibratoire est un outil puissant de diagnostic/pronostic des modes de défaillance des machines tournantes : elle sert essentiellement à détecter le défaut de balourd, d'alignement et combiné (balourd et désalignement). Ce défaut se caractérise par une fréquence de paramètres essentiels à savoir : déplacement (μm), vitesse (m/s), accélération (m/s^2).

Dans le présent article juste le défaut de balourd qui sera considéré, pour cela, nous optons la technique d'analyse d'accélération. Cette grandeur physique est mesurée par un capteur piézo-électrique placé sur un palier de guidage en rotation de l'arbre.

2.2 Dispositif expérimental

Le banc d'essai vibratoire est un dispositif d'expérimentation (voir Figure. 1) dédiée à tester et valider des approches de détection de défauts de balourd, de diagnostic et de pronostic. L'objectif prioritaire de dispositif vibratoire est de fournir des données expérimentales réelles qui caractérisent la dégradation tout au long de leur vie opérationnelle (jusqu'à leur défaillance totale).

Ce banc d'essai expérimental permet de réaliser les dégradations par le déséquilibre (qui se traduit par une augmentation de niveau de vibration). Les mesures des vibrations acquises par l'enregistrement se considèrent le point clés de notre étude. Les mesures se font à l'aide d'une sonde de mesure qui est à base d'un matériau piézo-électrique qui permet de convertir les vibrations mécaniques en signaux électriques qui vont être échantillonnés et traités par un logiciel informatique et tracer par suite la représentation temporelle de l'accélération.

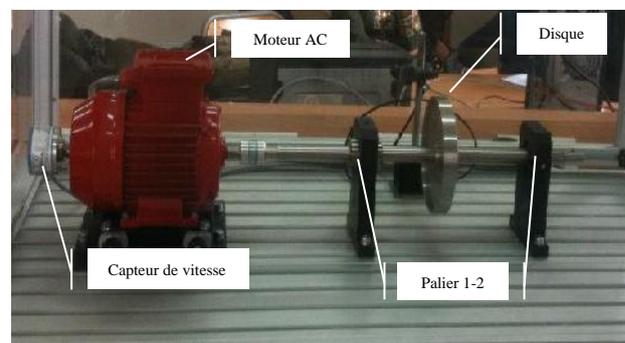


Figure 1: Banc d'essai vibratoire

Le dispositif est composé de trois parties principales : une partie rotative, une partie de génération de dégradation et une partie de mesure et d'acquisition, qui sont détaillées ci-après (voir Figure. 2).

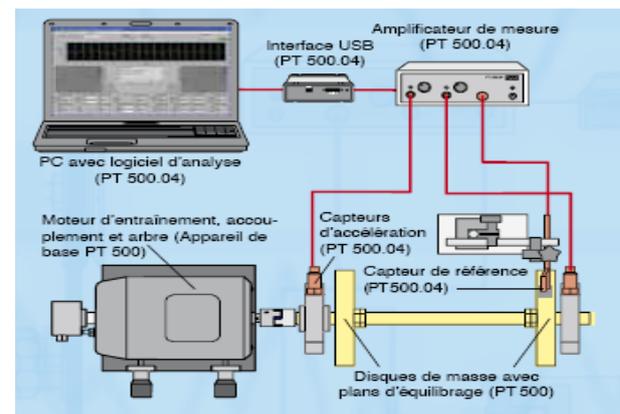


Figure 2: Connexions entre les parties du banc d'essai vibratoire

2.2.1 Partie tournante

Cette partie comprend le moteur électrique (AC), l'arbre et la roue. Le moteur est l'actionneur qui permet la rotation de l'arbre, ce dernier est guidé en rotation par deux paliers. Le moteur a une puissance égale à 250 W, la fréquence de rotation est commandée par un variateur de vitesse en agissant sur le courant d'excitation, ce qui permet au moteur AC d'atteindre sa vitesse nominale de 4000 tr/min sous une tension 110/200 V et un réseau de fréquence 60/50 Hz.

2.2.2 Partie de génération de dégradation

Cette partie comprend un disque en Aluminium de 140 (mm) en diamètre et d'épaisseur 26 (mm), sur lequel ont été réalisés plusieurs trous taraudés débouchant (18 perçages). Le disque est interposé entre les deux paliers, au milieu. Les trous en question ont pour objectif de créer le balourd.

2.2.3 Partie mesure et acquisition

Cette partie permet de mesurer et d'acquérir les vibrations générées par l'équilibre/ déséquilibre. Les mesures sont des grandeurs analogiques acquises à des vitesses de rotations différentes par un accéléromètre piézoélectrique à aimant fixé sur un palier.

3 DIAGNOSTIC

Cette partie sert à agir sur la vitesse de rotation par l'augmentation du courant d'excitation, comme déjà cité, pour obtenir les résultats d'accélération associé à chaque vitesse : 1000, 1500, 2000, 2500 et 3000 (tr/min) pour deux cas :

- 1^{er} cas : Cette expérience consiste à travailler avec le banc d'essai sans défaut associé, c'est-à-dire le disque ne représente aucun déséquilibre possible (absence de balourd). Le but de cette expérience est de détecter et interpréter les résultats des vibrations générés en absence de défaut.
- 2^{eme} cas : Cette expérience consiste à déséquilibrer le disque par la fixation d'une masse de 10 (g) afin de décaler le centre de masse du centre géométrique. Ce truc crée un balourd qui favorise des vibrations intenses, ces dernières induisent ensuite à une dégradation remarquable sur le système tout entier.

3.1 Dégradation dans le cas équilibré

L'objectif de ce test vise à déterminer et à visualiser le comportement vibratoire du système sans défaut. On mesure la valeur de l'accélération efficace pour les différentes vitesses de rotation (voir Figure. 3 : a, b, c, d et e).

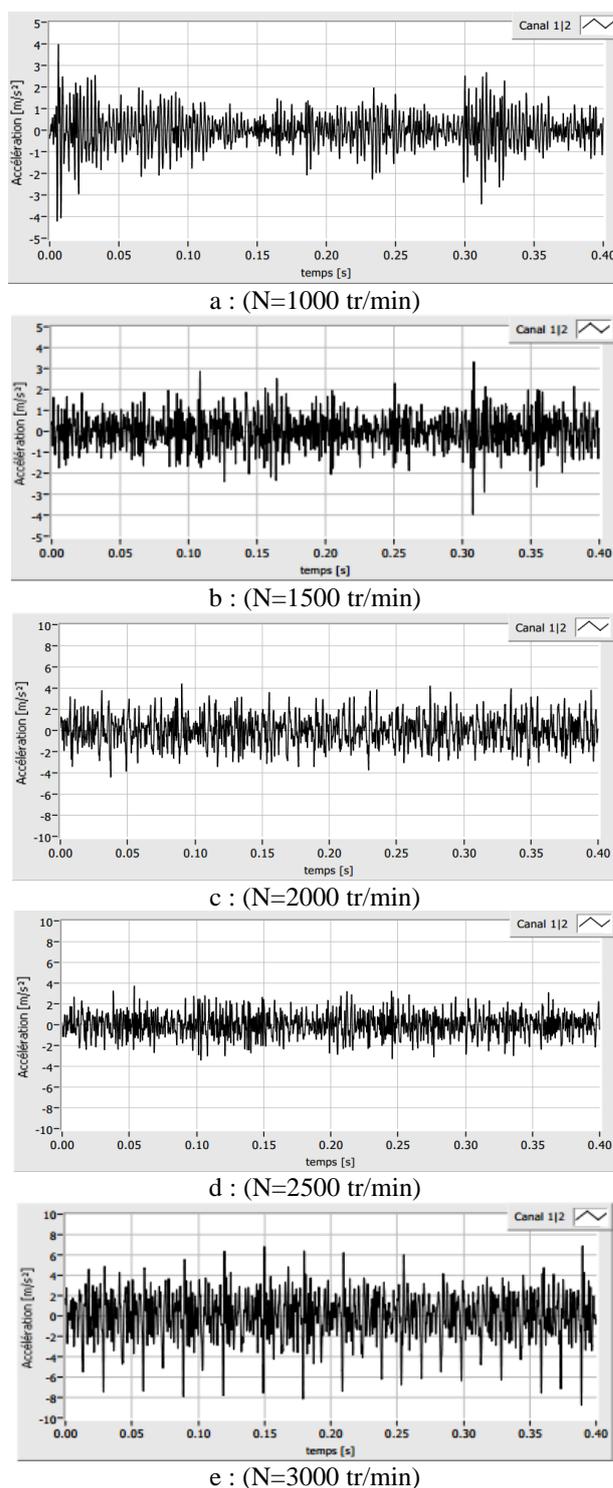


Figure 3 : Spectre temporel d'un test équilibré à N (tr/min)

On exploite les résultats précédents et on trace le comportement dans la Figure. 4. Cette dernière montre que l'accélération évolue graduellement si augmente la vitesse de rotation du moteur AC, par conséquent on peut arriver à une accélération énorme. La courbe indique une tendance vers un horizon défaillant.

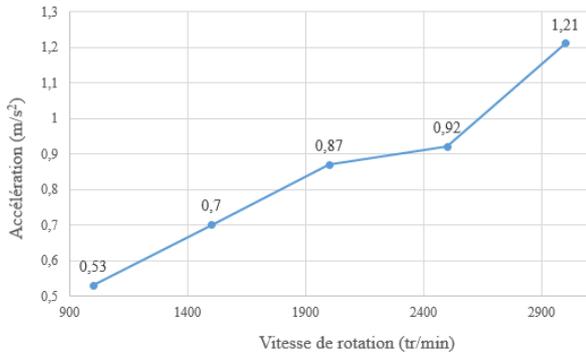
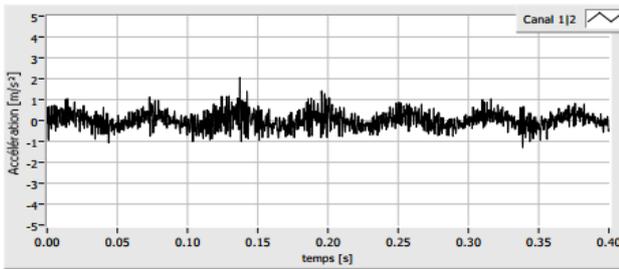


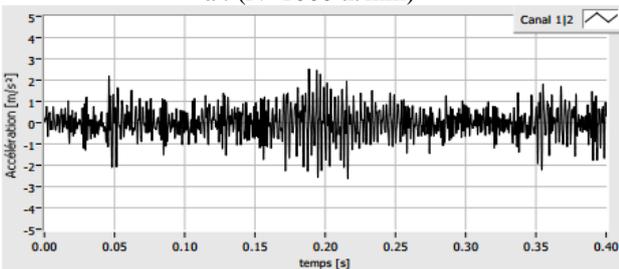
Figure 4 : Evolution de l'accélération (Cas équilibré)

3.2 Dégradation dans le cas déséquilibré

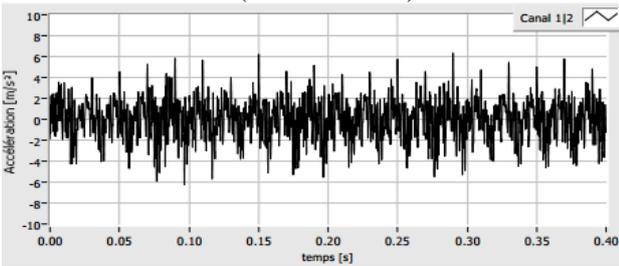
Dans ce cas, on ajoute la masse M sur le disque pour créer un déséquilibre, ce dernier représente le défaut de balourd. Le déséquilibre agit sur le comportement du système en entier, vu à des vibrations. Ce déséquilibre se constate pendant la rotation système ; on l'appelle " balourd dynamique ". Les deux paliers supportant le rotor vont subir à des efforts centrifuges d'une façon alternée. Les vitesses de rotation retenues sont les mêmes que le test équilibré : 1000, 1500, 2000, 2500 et 3000 (tr/min). On obtient la valeur de l'accélération efficace pour les différentes vitesses de rotation (Figure. 5 : a, b, c, d et e).



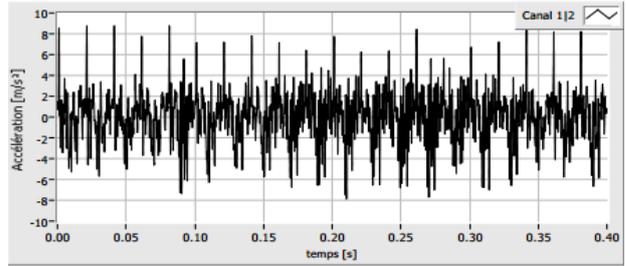
a : (N=1000 tr/min)



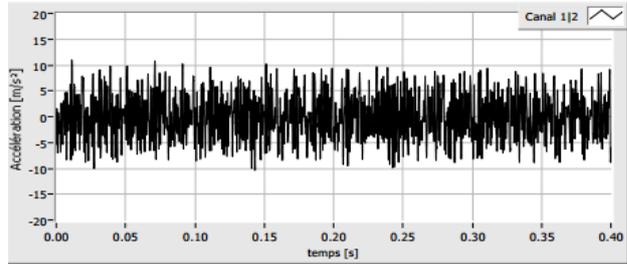
b : (N=1500 tr/min)



c : (N=2000 tr/min)



d : (N=2500 tr/min)



e : (N=3000 tr/min)

Figure 5 : Spectre temporel d'un test déséquilibré à N (tr/min)

L'exploitations des résultats précédents nous donne le tracé du comportement illustré dans la Figure. 6. D'après Cette figure, on constate que l'accélération évolue avec l'augmentation de la vitesse de rotation du moteur AC, par conséquent on peut arriver à une valeur critique, c'est-à-dire que la courbe tend vers un horizon de défaillance.

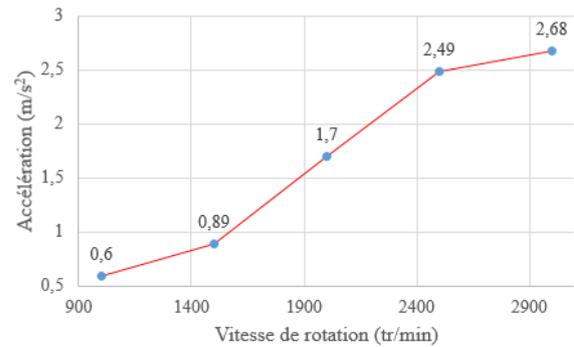


Figure 6 : Evolution de l'accélération (Cas déséquilibré)

3.3 Discussion

Lorsque notre système mécanique est équilibré (sans défauts), juste les faibles vibrations sont générées. Ce phénomène peut justifier par la fatigue de la machine et le jeu à cause de ses composants qui se dégradent au cours de fonctionnement et ses propriétés dynamiques qui varient.

En analysant les résultats, pour le test avec défaut de balourd, nous remarquons que le palier est plus sensible aux excitations et il donne des informations exploitables et significatives.

La Figure. 7, juste après, montre le défaut de balourd, la valeur de l'accélération croît en fonction de la vitesse de rotation, l'augmentation de ses valeurs est importante par rapport au premier test si l'on compare avec les valeurs de référence (sans défaut).

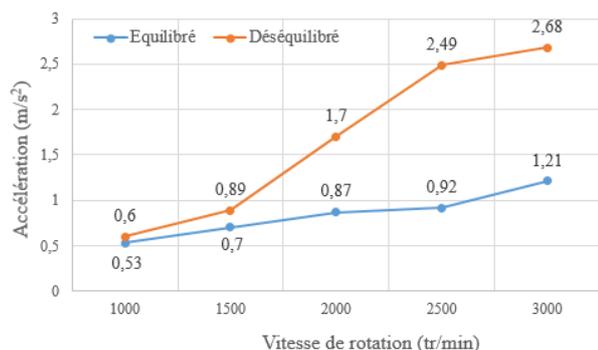


Figure 7 : Comparaison entre les deux tests effectués

4 PRONOSTIC

4.1 Résultats

L'objectif visé par le présent paragraphe est de caractériser le défaut mécanique usuel ou le plus connu, tels que le balourd et de le traduire en une fonction interpolée pour pouvoir le prédire. Pour ce faire, nous avons adopté une procédure expérimentale qui se résume comme suit : Nous avons exploité les mesures de RMS acquises et traitées par la partie mesure et acquisition avec défaut de balourd à une vitesse de rotation fixée à $N=2000$ (tr/min). Ensuite, nous avons suivi l'évolution de ce paramètre au cours du temps en prélevant les valeurs de RMS dans des instants aléatoires. Ces valeurs nous a permis de faire une corrélation d'interpolée qui va nous servir après de maîtriser l'état de santé futur du système par la prévision d'horizon.

Le tracé du RMS en fonction de temps est un outil efficace pour comprendre l'évolution du phénomène de balourd. L'objectif principal est de déterminer à travers des résultats observés expérimentalement, par analyse vibratoire l'influence du balourd sur les différents paramètres vibratoires de notre système pour prédire son état futur.

Le graphique illustré dans la Figure. 8 représente la variation de RMS au cours du temps de fonctionnement avec balourd ($m = 10$ g), mesurée dans des instants aléatoires pour le cas d'une vitesse de rotation constante ($N=2000$ tr/min).

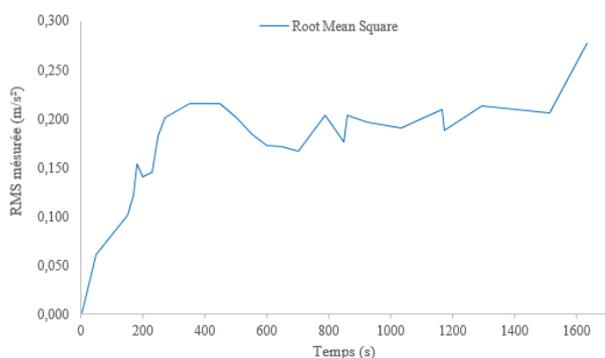


Figure 8 : Tracé des valeurs expérimentales de RMS (m/s^2)

On remarque que l'allure du graphique tracé peut être approximée par une fonction polynomiale de degré 6, avec un coefficient de corrélation d'ordre 0,9324, dans ce cas, on peut dire que notre interpolée de corrélation est forte tant qu'il tend vers 1 (voir Figure. 9).

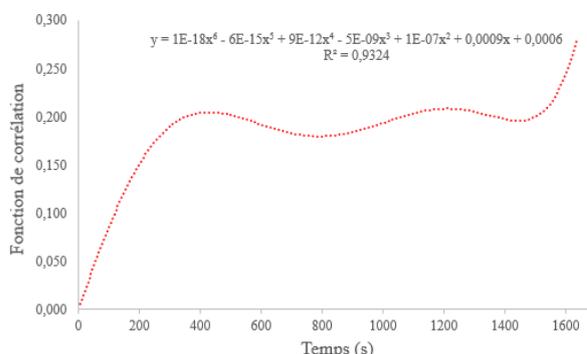


Figure 9 : Tracé de la fonction de corrélation

La Figure. 10 représente deux courbes pour le même système mécanique. La première est celle de la valeur RMS mesurée expérimentalement et la deuxième est celle de la valeur RMS Corrélée. Pour justifier la performance, nous constatons que la valeur de coefficient de corrélation représente une fonction d'approximation significative.

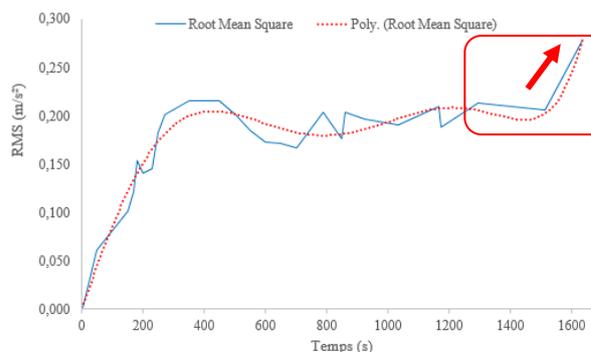


Figure 10 : Comparaison entre les deux résultats (mesuré et corrélé)

4.2 Discussion

L'étude présentée dans cette partie se concerne la prédiction de l'état de santé d'un système vibratoire avec défaut de balourd. Pour ce faire, nous avons adopté la méthode la plus connue et la plus efficace qui se base l'analyse vibratoire. En premier lieu, une détection des résultats expérimentaux de la valeur de RMS (voir Figure. 8), à partir des résultats on a tracé la courbe de tendance illustrées dans la Figure. 9, on constate que l'indicateur RMS entraîne une tendance vers l'horizon de défaillance car il croît au cours de fonctionnement sous une vitesse de rotation constante ($N=2000$ tr/min) à partir l'instant 800 s. La courbe de tendance présentée dans la Figure. 9 montre que le balourd a une influence sur l'évolution de l'indicateurs RMS. Par conséquent, le niveau vibratoire augmente dans le cas où le disque n'aura plus une intervention d'équilibrage.

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Un dispositif expérimental, appelé banc d'essai vibratoire, est présenté dans cet article. Son objectif intrinsèque est de fournir des données expérimentales associées aux dégradations du système avec le défaut de balourd. Ces données sont utilisées par suite pour diagnostiquer et pronostiquer le système vibratoire d'une part, pour tester et vérifier les méthodes de recherche dans les domaines suivants : surveillance des conditions, détection des défauts, vérification et contrôle d'autre part.

La particularité de ce travail est que la dégradation peut être réalisée dans des conditions de fonctionnement aussi bien constantes que variables et que les données sont acquises pendant toute la durée de chaque expérience.

Trois sortes de données expérimentales réalisées :

- Système équilibré avec 5 vitesses de rotation,
- Système déséquilibré (balourd) avec 5 vitesses de rotation,
- Système dégradable ($m=10$ g) avec une vitesse de rotation constante ($N=2000$ tr/min),

Enfin, on peut noter que ce travail expérimental sera une piste pour un test avec défaut d'alignement et une combinaison entre les deux défauts associés au système avec un système expert (IA), ensuite, on associe les deux défauts précédents avec le test effectué dans (Nectoux, P., et al., 2012) pour calculer la durée de vie restante du roulement de guidage.

REFERENCES

- EL Hannani, A., Refassi, K., EL Maiche, A., Bouamama, M., 2015, « Maintenance prédictive et préventive basée sur l'analyse vibratoires des rotors ». *Laboratoire de Mécanique des Solides et des Structures* ; Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Sidi Bel Abbes.
- Ertunc, H. M., and Oysu, C., 2004, "Drill wear monitoring using cutting force signals," *Mechatronics*, vol. 14, pp. 533–548.
- Kacprzyński, G., Sarlashkar, A., Roemer, M., Hess, A., and Hardman, W., "Predicting remaining gear life by fusing diagnostics and physics of failure models," *JOM Journal*, vol. 56, no. 3, pp. 29–35, 2004.
- Nectoux, P., Gouriveau, R., Medjaher, K., Ramasso, E., Chebel-Morello, B., et al., Jun 2012, "PRONOSTIA: An experimental platform for bearings accelerated degradation tests". *IEEE International Conference on Prognostics and Health Management, PHM'12.*, Denver, Colorado, United States. pp.1-8. hal-00719503.
- NSF., IUCRC Center for Intelligent Maintenance Systems, visited in January 2012, "Prognostic data repository: Bearing data set," in <http://ti.arc.nasa.gov/tech/dash/pcoe/prognostic-data-repository/>.
- Ocak, H., Loparo, K. A., and Discenzo, F. M., 2007, "Online tracking of bearing wear using wavelet packet decomposition and probabilistic modeling: A method for bearing prognostics", *Journal of sound and vibration*, vol. 302, pp. 951-961.
- Peng, Y. and Dong, M., 2011, "A prognosis method using age-dependent hidden semi-markov model for equipment health prediction," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, pp. 237–252.
- Ren, Q., Balazinski, M., Baron, L., and Jemielniak, K., 2001, "Tsk fuzzy modeling for tool wear condition in turning processes: An experimental study," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 24, no. 2, pp. 260 – 265.
- Semma, EL., Mousrij, A., and Gziri, H., Nov. 2014, « Elaboration d'une démarche de mise en œuvre de la maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire ». *MOSIM 2014, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation*, Nancy, France. Hal-01166665.
- Zhou, J., Li, X., Gan, O. P., Han, S., and Ng, W. K., 2006, "Genetic algorithms for feature subset selection in equipment fault diagnostics," *Journal of Engineering asset management*, vol. 10, pp. 1104–1113.