

METHODE DE DIAGNOSTIC D'UN REDUCTEUR PLANETAIRE PAR L'ANALYSE DE LA FORME D'ONDE TEMPORELLE

DIAGNOSTIC METHOD OF PLENETARY GEARBOX BY WAVE FORM ANALYSIS



| Angelico Andriamasinady ^{1,2*} | Ramaroson Mamiarijaona ² | Mohamed Ebn Touhami ¹ | Rida Allah Belakhmima ¹ |
et | Rajaonah Rabevala ² |

¹ Université Ibn Tofail | Faculté des sciences | Laboratoire des matériaux | Kenitra | Maroc |

² Université d'Antsirananana | Ecole Supérieure Polytechnique | Laboratoire Mécanique appliquée | Antsirananana | Madagascar |

| Received October 17, 2021 |

| Accepted November 25, 2021 |

| Published November 30, 2021 |

| ID Article | Andriamasinady-Ref01-ajira171121 |

RESUME

Introduction : L'analyse vibratoire est aujourd'hui un outil incontestable pour la maintenance conditionnelle des machines tournantes. Son but final est de tendre à la suppression des maintenances curatives et décaler les maintenances préventives. L'analyse vibratoire permet d'avoir une image de l'état de santé mécanique des machines tournantes et ainsi détecter d'éventuels dysfonctionnements afin de prévoir des actions correctives. **Contexte :** Le contrôle et le diagnostic sont aujourd'hui d'importance dans la plupart des secteurs industriels. Ils consistent à mesurer des signaux physiques sur des machines, installations industrielles, ... puis grâce à leur analyse, il s'agit de délivrer un diagnostic sur leur état mécanique. Cette démarche permet de garantir et d'assurer la sécurité des biens et des personnes, de respecter les contraintes d'environnement (normes...), d'optimiser les opérations de maintenance en pratiquant la maintenance conditionnelle ou prédictive et ainsi, d'assurer la disponibilité des machines. **Objectifs :** Présenter une méthode d'analyse du signal temporel que nous avons considérée très importante pour le diagnostic des réducteurs planétaires. L'analyse est effectuée sur le logiciel DDS et le résultat de diagnostic sera validé par l'image endoscopique. **Méthodes :** Analyse du signal temporel et diagnostic par reconnaissance des formes sur un réducteur planétaire. **Résultats :** Analyse du signal temporel et le diagnostic par reconnaissance des formes ont montré qu'il y a la présence d'un défaut au niveau du flanc de la denture de la couronne et le signal temporel filtré à la fréquence de rotation porte satellite nous a permis de voir clairement la géométrie des impacts générés entre les dents. La mise en forme circulaire d'onde temporelle nous a aidés à préciser que la source de la vibration du réducteur est la défaillance au niveau de la denture de couronne. **Conclusions :** Cette étude prouve l'importance d'analyse approfondie des signaux vibratoire pour le diagnostic d'état de santé d'un réducteur planétaire. La méthode proposée est d'intérêt et suffisante pour appréhender la plupart des problèmes de diagnostic d'engrenages ; elle est très importante lorsqu'on fait le diagnostic des machines complexes telles que les réducteurs planétaire et les multiplicateurs d'éolienne. La méthode d'analyse de signal temporel permet donc dans ce cas de détecter la présence d'un défaut et de déterminer quelle est la partie abîmée.

Mots-clés: Engrenage, vibrations, modulations, temps-fréquence, résolution, défaillance.

ABSTRACT

Introduction: Vibration analysis is today an indisputable tool for the condition-based maintenance of rotating machines. Its final goal is to tend to the elimination of curative maintenances and to postpone preventive maintenances. Vibration analysis makes it possible to have an image of the mechanical status of health of rotating machines and thus detect possible malfunctions in order to plan corrective actions. **Context:** Monitoring and diagnostics are important today in most industrial sectors. They consist in measuring physical signals on machines, industrial installations, ... then, using their analysis, it can deliver a diagnosis of their mechanical status. This approach makes it possible to guarantee and ensure the safety of the equipment and people, to respect environmental constraints (standards, etc.), to optimize maintenance operations by practicing conditional or predictive maintenance and thus to ensure availability of machines. **Aims:** To present a method of analyzing the time wave form signal that we have considered very important for the diagnosis of planetary gearboxes. The analysis is performed on the DDS software and the diagnostic result will be validated by the endoscopic image. **Methods:** Time wave form signal analysis and diagnosis by pattern recognition on a planetary gearbox. **Conclusions:** This study proves the importance of an in-depth analysis of vibratory signals for the diagnosis of the health status of a planetary gearbox. The proposed method is of interest and sufficient to apprehend most gear diagnostic problems; it is very important when diagnosing complex machines such as planetary gearboxes and wind turbine gearboxes. The signal waveform analysis method therefore makes it possible in this case to detect the presence of a fault and to determine which part is damaged.

Keywords: Gear, vibration, modulation, time-frequency, resolution, failure.

1. INTRODUCTION

La mise en place d'un programme de maintenance prévisionnelle (parfois appelée maintenance prédictive) pose toujours la question des méthodes de surveillance à retenir. Gardons avant tout en mémoire que l'objectif d'un programme de maintenance prévisionnelle est d'anticiper la dégradation du niveau de fonctionnement d'une machine, pour programmer des interventions justifiées. On est donc ici dans une logique de maintenance préventive conditionnelle programmée, basée sur l'extrapolation d'une tendance comportementale. L'anticipation sera d'autant plus efficace que la méthode d'analyse retenue sera capable d'identifier les défauts à partir des signaux vibratoire (détection le plus en amont possible). C'est exactement ce que permet l'analyse vibratoire. Un signal temporel vibratoire est une donnée « riche »

dans laquelle il est possible de lire des défauts extrêmement ténus, comme l'écaillage d'une bille dans un roulement et arrachement d'un métal de la denture dans une boîte d'engrènement. L'autre avantage de la richesse d'un signal temporel vibratoire est de permettre d'expliquer un comportement inquiétant. L'analyse vibratoire ne se contente pas d'alerter, elle est capable de fournir un vrai diagnostic pour orienter l'action de maintenance. C'est d'ailleurs une des raisons pour lesquelles elle est utilisée depuis des années dans la surveillance de machines critiques dans des industries lourdes, où les techniciens doivent absolument comprendre ce qui se passe avant même d'ouvrir la machine. Cette étape permet de dégager des « symptômes » sur les signaux, symptômes qu'il s'agit de mettre en évidence grâce à des méthodes de traitement des signaux [1]. L'analyse vibratoire peut néanmoins sembler difficile à appréhender et réservée à des spécialistes. Si vous en êtes à ce stade de votre réflexion, nous vous éclairons dans cet article sur l'analyse vibratoire, en vous expliquant comment l'analyse d'un signal temporel permet de détecter un défaut naissant au niveau de la couronne d'un réducteur planétaire. L'utilisation des signaux acoustiques et vibratoires s'avère pertinente car on peut appréhender les phénomènes dynamiques que l'on rencontre dans les systèmes en fonctionnement [1].

2. MATERIELS AND METHODES

2.1 Les matériels utilisés

Les matériels utilisés sont énumérés dans le tableau ci-après :

Tableau 1 : Le tableau présente les matériels utilisés.

Matériels	Types	Gamme	Marque
Analyseur	VA5 Pro	0,35Hz-90Kz	Adash
Accéléromètre	A115-1A	100mV/g	Adash
Endoscope	Industrial Videoscope		Yateks
Laptop	Core i5	CPU 1,60 GHz	HP

2.2 Méthodes : Analyse de la forme d'onde temporelle.

Pour faire simple, et en première approche, on peut dire qu'un signal est la manifestation physique d'une information qui est transportée d'une source vers une destination : en pratique, c'est souvent une grandeur physique qui varie au cours du temps. Ceci est en réalité un peu restrictif mais correspond bien à la plupart des cas pratiques. Par exemple, puisqu'en Mesures Physiques, on est intéressé par la mesure et par les capteurs, la tension délivrée par tout capteur est typiquement un signal qui peut faire l'objet des propos qui vont suivre [5].

Cette technique a pour but de fournir des éléments de compréhension pour l'analyse des signaux vibratoire d'un réducteur planétaire. L'analyse consiste à décomposer l'énergie du signal analysé par bandes de fréquence. Il en résulte une analyse plus fine que l'analyse par valeur RMS, avec la possibilité d'associer le domaine fréquentiel et temporel.

L'analyse dans le domaine fréquentiel est la contre-partie indispensable de l'analyse dans le domaine temporel du signal ; il n'est en effet pas rare que des phénomènes difficilement discernables dans l'un des domaines apparaissent clairement dans l'autre. Enfin, l'analyse jouit de propriétés remarquables qui en font un outil indispensable pour réaliser de nombreux traitements : filtrage, mise en forme du signal, étude de modulation, etc. Le planétaire étudié est composé de trois satellites, un solaire et une couronne fixe comportant respectivement 46, 17 et 109 dents. L'arbre d'entraînement du réducteur sous test tourne à la vitesse de 777 trs/min, soit 12,95 Hz. De façon générale les vibrations d'un engrenage sont produites principalement par le choc entre les dents des deux roues qui le composent. Ce choc est affaibli au maximum par une optimisation de la forme des dents : une développante de cercle légèrement corrigée pour tenir compte de la déflexion sous la charge. Comme pour les autres réducteurs on peut calculer les fréquences d'engrènement du planétaire.

Le ratio i de ce planétaire est donnée par la relation suivante :

$$i = \frac{N_c + N_s}{N_s} = \frac{109 + 17}{17} \quad i = 7,41, \quad (1)$$

, dont N_c et N_s désignent respectivement les nombres des dents de la couronne et du satellite.

A partir du ratio i nous pourrions calculer les autres fréquences du planétaire.

$$V_p = \frac{V_s}{i} = \frac{771}{7,41}, \quad V_p = 104,04 \text{ trs/mn}, \quad (2)$$

$$V_{st} = V_p * \frac{N_c}{N_{st}} = 104,04 * \frac{109}{46}, \quad V_{st} = 246,5 \text{ trs/mn}, \quad (3)$$

, dont V_p , V_s , V_{st} et N_{st} désignent respectivement les vitesses rotation du porte stellite, solaire, satellite et le nombre des dents du pignon satellite. Le signal d'engrènement, est périodique, et sa fréquence est égale à la fréquence de rotation de l'une des deux roues, multipliée par le nombre de dents de cette roue [2]. La fréquence d'engrènement F est donnée par la relation suivante :

15/09/2021. La dernière vacation était complétée par l'inspection endoscopique pour valider les résultats de la méthode d'analyse appliquée.

3.1 Le comportement du réducteur d'après le relevé du 25/09/2020.

Aucune anomalie majeure n'a été révélée par le signal temporel (figure 2). Le signal filtré à la fréquence de rotation porte satellite $V_p = 104,04$ RPM ne montre pas la géométrie de la cinématique des satellites car l'état de la denture de la couronne était encore admissible ou sans défaut (figure 3). La présence d'un pic 188Hz correspondant à la fréquence d'engrènement satellite F_{st} , ne signifie pas un problème ou une anomalie, en fait l'objectif est de détecter un défaut avec une simple analyse de signal temporel (figure 4).

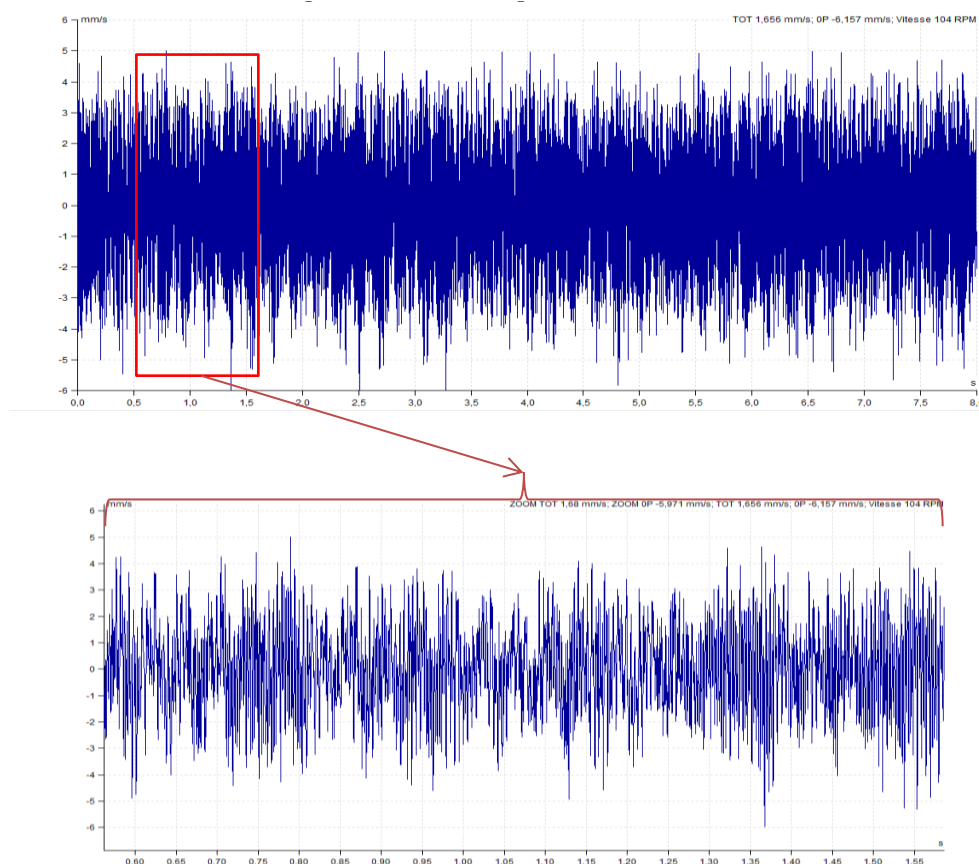


Figure 2 : Signal temporel dans la direction radiale du 25/09/2020.

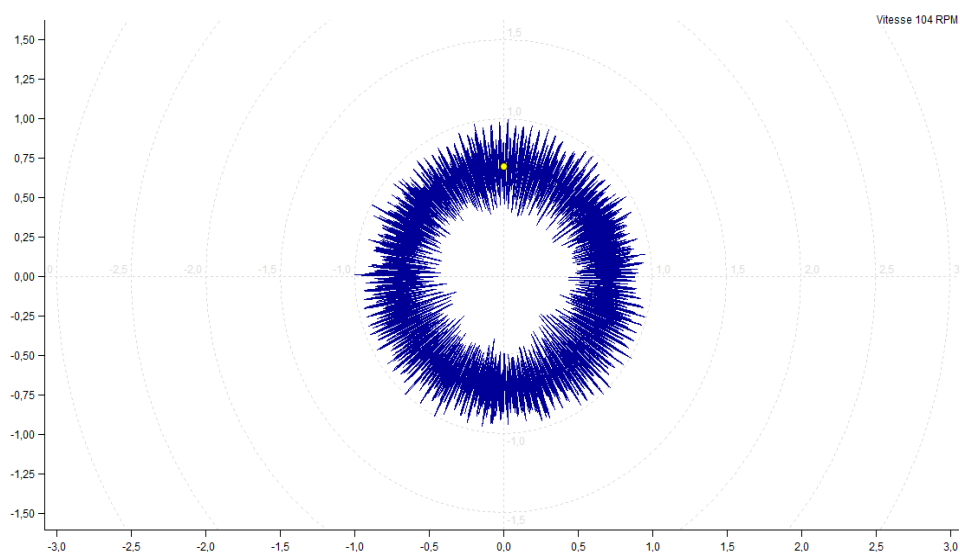


Figure 3 : Signal temporel en forme circulaire filtré et configuré à la vitesse V_p du porte satellite.

Le but ici est d'apparaître la géométrie de la cinématique de la défaillance des dentures au niveau du satellite-couronne. Comme l'état des dentures de la couronne est encore admissible et sans défaut permettant de modifier la forme d'onde chaque passage des trois satellites, par conséquent la géométrie de passage par révolution est en générale de forme circulaire (figure3).

D'un point de vue fonctionnel, le degré d'usure acceptable dépend de la durée de vie requise, des contraintes en termes

de bruit et vibration des engrenages. Ainsi, une usure excessive se caractérise-t-elle par une diminution de l'épaisseur de la dent qui peut influencer sur la fatigue par flexion en pied de dent parce que l'usure y est maximale, [9]. Par ailleurs, l'usure est un processus d'enlèvement de matière générant des écarts de forme par rapport aux profils théoriques des dentures. On peut donc s'attendre à des comportements dynamiques perturbés par rapport au comportement nominal ou théorique caractérisé pour des dentures sans usure.

Dans une étude expérimentale et théorique, Yesilyurt et al., (2003) ont étudié l'influence de l'usure sur le niveau de vibration pour des engrenages droits [10]. Le spectre sur la Figure 4 et le signal temporel sur les figures 2,3 montrent, pour des engrenages sans usure, que les vibrations sont des ondes sinusoïdales sensiblement uniformes dans le temps.

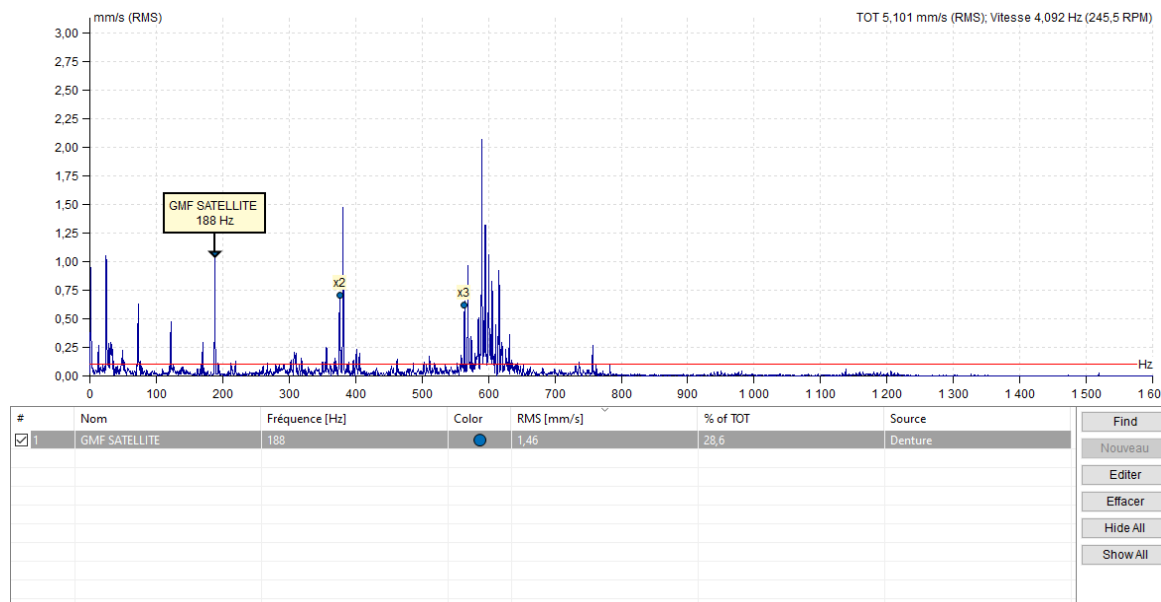
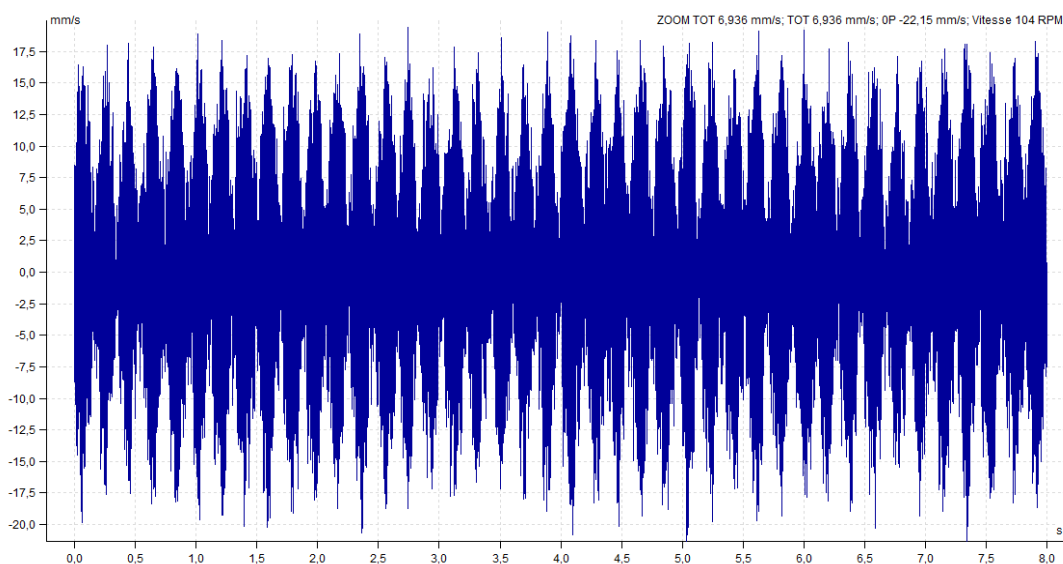


Figure 4 : Spectre dans la direction radiale du 25/09/2020.

3.2 Le comportement du réducteur d'après le relevé du 15/09/2021.

Pour assurer la répétabilité de la mesure, la vibration a été relevée sur le même point du réducteur par rapport à l'ancienne vacation. Après avoir effectué le relevé vibratoire sur le réducteur, nous avons appliqué la même méthode de diagnostic et de traitement sur les signaux temporel. Le signal temporel se présente sous la forme d'impact avec modulation d'amplitude, signifiant le changement d'état de santé de la machine (figure 5a). L'onde vibratoire est modulée par fréquence de 5,2Hz, correspondant à la vitesse de passage d'un satellite (voir tableau 2) sur un point de la circonférence de couronne (figure 5b). L'information révélée par le signal aussi montre la présence d'une fréquence de 376 Hz (figure 6), d'après les valeurs résumées dans le tableau 2, cela indique la deuxième harmonique de la fréquence d'engrènement satellite F_{st} .

Le signal filtré à la fréquence de rotation porte satellite $V_p = 104,04$ RPM, montre l'apparition des impacts générés par le passage des trois satellites sur un défaut localisé de la couronne (figure 7).



Fréquence de modulation 5,22 Hz

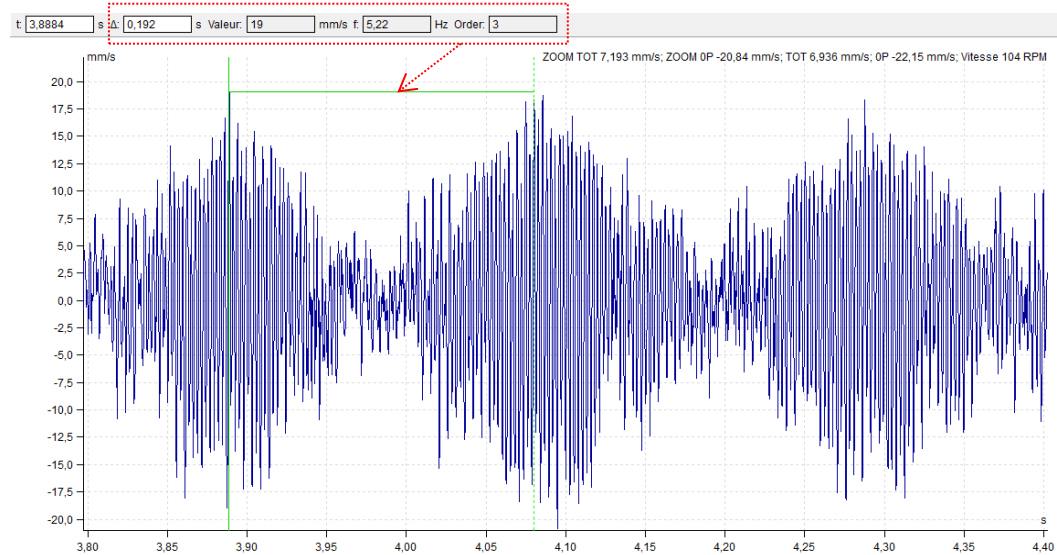


Figure 5b : Signal temporel avec la fréquence de modulation filtrée à la fréquence égal à 104RPM 15/09/2021.

La valeur 5,22 Hz désigne la fréquence de passage du satellite et ici correspondant à la fréquence de modulation du signal temporel. La valeur l'ordre 3, indique le nombre de satellite, car le signal est filtré à la fréquence égale à la vitesse de porte satellite (figure 5b). On constate un pic à 188 Hz (figure 6) égal à la fréquence d'engrènement satellite ; la deuxième harmonique est elle aussi présente (375,9 Hz ou 376Hz Hz) (figure 6). Avec ces seules informations, la présence du défaut est détectée. Il s'agit en fait de la modulation de deuxième harmonique de la fréquence d'engrènement satellite par la fréquence de passage des satellites.

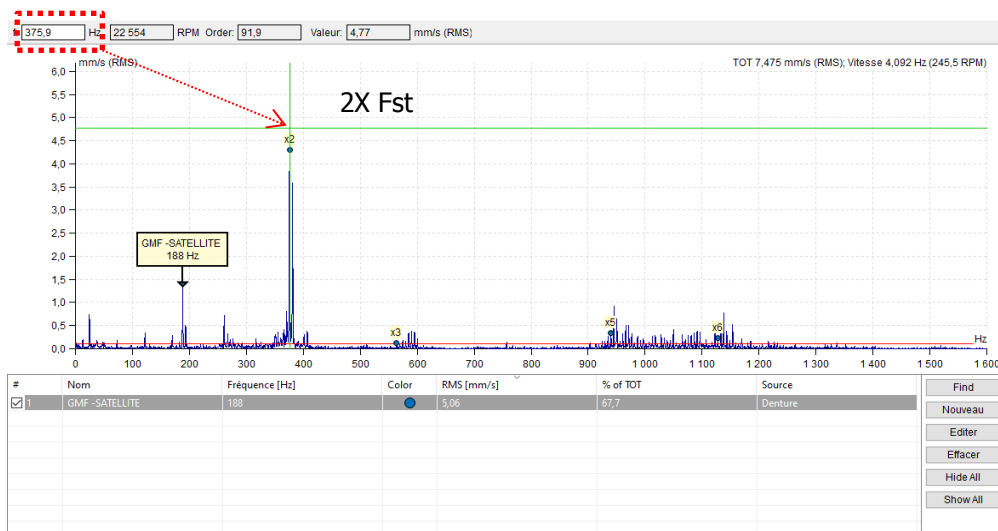
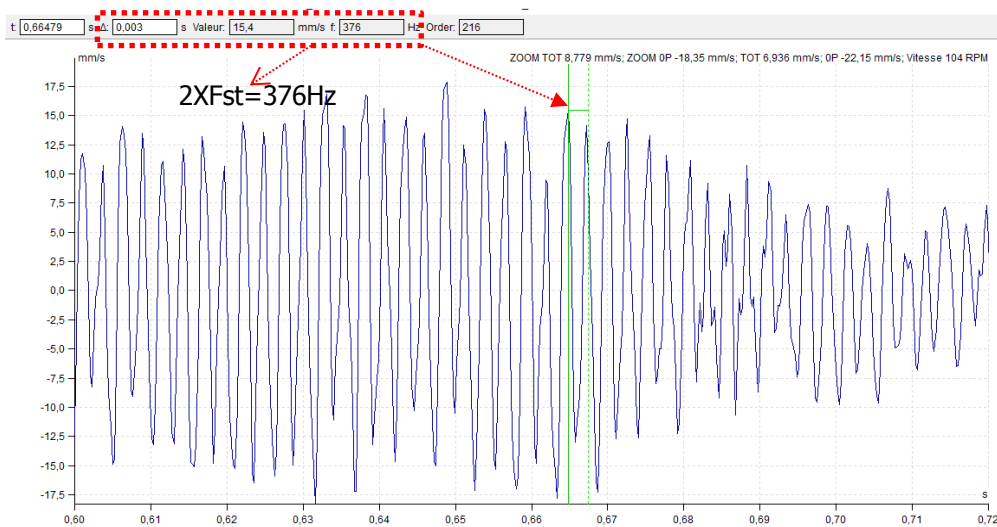


Figure 6 : Signal temporel et spectre représentant l'harmonique de la fréquence d'engrènement de satellite .15/09/2021.

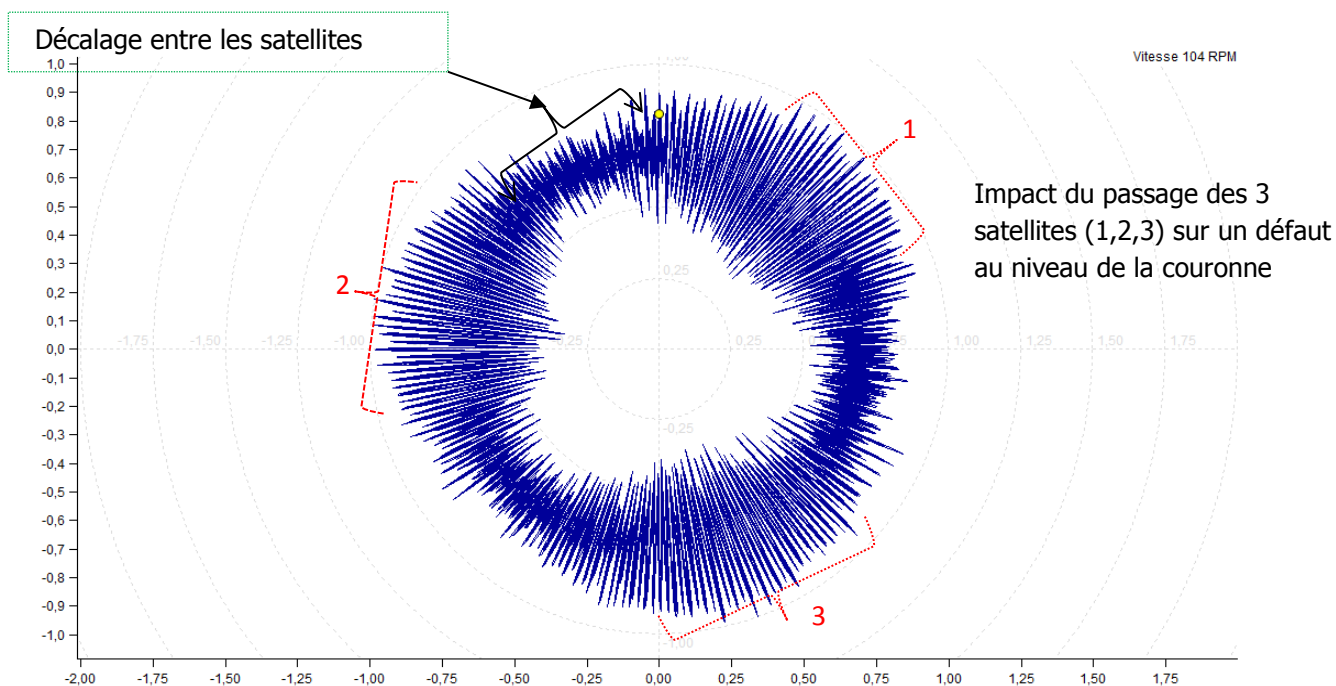


Figure 7 : Signal temporel en forme circulaire filtré et configuré à la vitesse V_p de la porte satellite. 15/09/2021.

La présentation circulaire configurée à la Vitesse de rotation porte satellite nous a permis de voir clairement la géométrie des impacts générés par le satellite à chaque fois qu'il heurte le défaut. L'apparition de cette forme géométrique est due au passage de chaque satellite sur la denture défailante et fixe sur la couronne. Lorsque le premier satellite engrène sur la dent défailante, il génère les impacts (1) mais comme si la position des trois satellites est décalée par un angle Θ entre eux, il y a aussi un laps de temps pour que le deuxième satellite passe sur le défaut en créant de son tour les seconds impacts (2). Et les troisièmes impacts seront obtenus de la même manière que les deux autres précédant, voilà pourquoi nous avons eu la forme géométrique de la position des satellites sur la figure 7. L'augmentation de l'harmonique ($2XF_{st}$) de la fréquence de satellite (figure 6) indique le désalignement des engrenages, possible due au manque de jeu du fond denture, mais la forme d'onde temporelle circulaire nous confirme que la source de la vibration du réducteur est la défailance au niveau de la denture de la couronne.

Nous allons valider le résultat de diagnostic obtenu par l'analyse de la forme d'onde par les images endoscopiques.

3.3 Le résultat de l'inspection endoscopique sur le réducteur.

Pour confirmer le résultat et valider la méthode d'analyse adoptée afin de visualiser clairement les défauts localisés sur la couronne du réducteur planétaire, nous avons effectuée l'inspection endoscopique durant l'arrêt de la machine une semaine avant la maintenance générale.



Figure 8 : Photo présentant un défaut sur le flanc de la dent de la couronne.



Figure 9 : Photo présentant un défaut sur le flanc de la dent de la couronne.



Figure 10 : Photo présentant une partie sans défaut sur le flanc de la dent de la couronne.

L'inspection endoscopique nous confirme finalement la présence de la défaillance au niveau de la denture de la couronne (figure 8 et 9). Nous avons utilisé cette technique pour mettre en évidence le défaut et aussi plus précisément dans le but de prouver l'efficacité de la méthode d'analyse d'un planétaire en utilisant le signal temporel. La configuration du signal à la fréquence de rotation porte satellite permet de confirmer la localisation d'un défaut, sur la couronne ou sur le satellite. La mise en forme circulaire de la forme d'onde temporelle filtrée à la fréquence porte satellite, joue un rôle important sur la précision de localisation du défaut des dentures de la couronne ou satellite.

Les dentures des engrenages sont soumises à des combinaisons complexes de roulement et de glissement qui évoluent au long du profil. Sur la saillie de la denture (partie haute), les directions du roulement et du glissement sont les mêmes (positifs), par contre, au voisinage du creux de denture, la direction du glissement (négligé) est opposée à celle du roulement. Il a été noté que la fatigue de contact par piqure apparaît de manière privilégiée dans les creux de dents, [6,7,8], (Figure 9).

4. CONCLUSION

Nous avons présenté dans cet article une méthode de diagnostic utilisable pour la surveillance et le diagnostic de d'un planétaire à l'aide de mesures vibratoires. Cette méthode est d'intérêt et suffisante pour appréhender la plupart des problèmes de diagnostic d'engrenages ; elle est très importante lorsqu'on fait le diagnostic des machines complexes telles que les réducteurs planétaire et les multiplicateurs d'éolienne. La mise en forme circulaire du signal temporel s'avère être un complément important de l'analyse du spectre dans l'étude des vibrations d'engrenage. En effet l'état d'usure d'un réducteur est fortement lié aux phénomènes de modulation que présentent les vibrations de l'engrenage. Or, ces modulations sont de faible énergie par rapport au signal d'engrènement, ce qui rend leur détection difficile. Dans le spectre, leur présence se traduit par des séries de raies, mais la durée du signal étudié n'offre pas toujours une résolution suffisante en fréquence pour qu'on puisse séparer les différentes séries de raies et les attribuer aux phénomènes qui en sont la cause.

La méthode d'analyse du signal temporel que nous avons proposé dans cet article a permis de confirmer la source et la localité d'un défaut où le spectre n'en montrait qu'une augmentation de la 2^e harmonique de la fréquence de satellite qui n'était pas suffisant pour savoir la source de défaut. L'exemple traité mettant particulièrement bien en relief l'efficacité de la méthode d'analyse de signal temporel pour localiser et confirmer la présence des défauts dans un planétaire. La méthode est efficace non seulement sur la localisation et la présence du défaut, mais aussi pour juger la sévérité.

En résumé, la méthode d'analyse de signal temporel permet donc dans ce cas de détecter la présence d'un défaut et de déterminer quelle est la partie abîmée. Ce défaut est évident dans le signal temporel, pas dans le spectre [12]. Le comportement dynamique des engrenages peut être caractérisé dans certaines gammes de vitesses par des amplifications d'effort sur les contacts entre dents et des oscillations des niveaux de chargement qui peuvent influencer sur l'usure des flancs. A l'inverse, les variations de forme engendrées par l'usure des dentures vont modifier les conditions de contact et par conséquent les efforts dynamiques aux contacts. Les deux phénomènes sont donc couplés et susceptibles d'évoluer de façon différente en fonction des vitesses de rotation. Etant donné que l'utilisation de cette méthode pour le contrôle du planétaire, d'après ces études, est efficace cette technique semble être un atout important pour les analystes de la vibration des machines tournantes industrielle.

5. REFERENCES

1. Jérôme Antoni, Menad Sidahmed. Contrôle et diagnostic à partir des signaux acoustiques et vibratoires. UMR UTC/CNRS 6066 Roberval Université de Technologie de Compiègne. Spécial congrès Surveillance 5. *Acoustique & Techniques*. 2004;(38): pp 9-15. Available on: http://www.infobruit.com/revues/78_10455.PDF
2. Cécile Capdessus et Menad Sidahmed. Analyse des vibrations d'un engrenage : Cépstere, Corrélation Spectre. *Traitement du Signal*. 8(5) : 365-372. Available on : <http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/1773/nondispo.pdf?sequence=1>
3. Landolsi Foued, cours de surveillance technique. Nabeul : Resource technique pour l'enseignement technologique, 2017. Available on: <https://www.technologuepro.com/cours-genie-mecanique/cours-1-techniques-surveillance/>
4. Thiry C., Diagnostic vibratoire des roulements dans une machine tournante, Belgique, Université de Liège. *Revue Scientifique des ISILF*. 2006;(20): pp 158-171. Available on: <http://www.isilf.be/Articles/ISILF06p157gramme.pdf>
5. Wells A Olivier BACHELIER. Un premier pas en traitement du signal, Cours Un premier pas en traitement du signal, Poitiers : Université de Poitiers, 2016. Available on : https://www.lias-lab.fr/perso/olivierbachelier/reserve_docs/TdS_MP.pdf
6. Fernandes, P.J.L., McDuling, C. Surface contact fatigue failures in gears. *Engineering Failure Analysis*. 1997;4: 99-107. Available on: <https://www.semanticscholar.org/paper/Surface-contact-fatigue-failures-in-gears-Fernandes-McDuling/8358a05806c7a6b9debcc817e1a110a6094fc7ec>
7. Aslantaş, K., Taşgetiren, S., Yalçın, Y. Austempering retards pitting failure in ductile iron spur gears. *Engineering Failure Analysis*. 2004;11: 935-941. Available on: <https://ur.booksc.eu/book/3589986/117dab>
8. Zhou, R.S., Cheng, H.S., Mura, T. Micropitting in rolling and sliding contact under mixed lubrication. *ASME, Journal of Tribology*. 1989;111: 605-613. Available on: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1083.1821&rep=rep1&type=pdf>
9. Gee, A.W.J., Begelinger, A., Salomon, G. Failure Mechanisms in Sliding Concentrated Contacts. Proceedings 11th Leeds-Lyon symposium on tribology. *Butterworths*. 1985; p.105-116. Available on: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/004316489190363Y>
10. Yesilyurt, I., Gu, F., Ball, A.D. Gear tooth stiffness reduction measurement using modal analysis and its use in wear fault severity assessment of spur gears. *NDT & E International*. 2003;36: 357-372. Available on : <https://pure.hud.ac.uk/en/publications/gear-tooth-stiffness-reduction-measurement-using-modal-analysis-a>
11. McFadden P. D., Detection fatigue cracks in gears by amplitude and phase demodulation of the meshing vibration. *J. Vib., Acoust., Stress, and Reliab.* Apr 1986 ; 108(2): 165-170. Available on : <https://doi.org/10.1115/1.3269317>
12. Mobius Institute, Analyse vibratoire niveau III-Partie 2, Analyse du spectre et du signal temporel. Belgique : Centre de formation I-care Group, copyright(c) Mobius Intitute 2005. P 13-26.



Cite this article: **Angelico Andriamasinady, Ramaroson Mamiarijaona, Rajaonah Rabevala et Rida Allah Belakhmima.** DIAGNOSTIC METHOD OF PLENETARY GEARBOX BY WAVE FORM ANALYSIS. *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2021; 13(5): 549-557.

This is an Open Access article distributed in accordance with the Creative Commons Attribution Non Commercial (CC BY-NC 4.0) license, which permits others to distribute, remix, adapt, build upon this work non-commercially, and license their derivative works on different terms, provided the original work is properly cited and the use is non-commercial. See: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>