

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Mécanique

Laboratoire de Génie Mécanique et de Développement

Mémoire de Master

Pour l'obtention du diplôme de Master en mécanique des solides

Diagnostic de la rupture de l'arbre d'une machine tournante dans la centrale thermique de CAP-DJINET par des méthodes fréquentielles

Réalisé par :

HOUARI Abdenour

Sous la direction de :

Pr. Saïd. RECHAK

Présenté et soutenu publiquement le : 28/06/2016

Composition du Jury :

Président :	Yacine BELKACEMI	Dr. Enseignant Chercheur, ENP, Alger
Promoteur :	Saïd RECHAK	Professeur, ENP, Alger
Examineur :	Hacène BELHANECHÉ	Docteur, ENP, Alger

ENP 2016

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Mécanique

Laboratoire de Génie Mécanique et de Développement

Mémoire de Master

Pour l'obtention du diplôme de Master en mécanique des solides

Diagnostic de la rupture de l'arbre d'une machine tournante dans la centrale thermique de CAP-DJINET par des méthodes fréquentielles

Réalisé par :

HOUARI Abdenour

Sous la direction de :

Pr. Saïd. RECHAK

Présenté et soutenu publiquement le : 28/06/2016

Composition du Jury :

Président :	Yacine BELKACEMI	Dr. Enseignant Chercheur, ENP, Alger
Promoteur :	Saïd RECHAK	Professeur, ENP, Alger
Examineur :	Hacène BELHANECHÉ	Docteur, ENP, Alger

ENP 2016

مقدمة

ظواهر تسبب تشوهات في الآلات الصناعية عديدة. هذه العيوب هي بالتأكيد مضرّة وتسبب انهيار الجزئي أو الكلي للآلة الاهتزاز هو واحد من تلك الظواهر موجودة في الأنظمة الديناميكية، وخاصة في الآلات الدوارة. وأفيد أن رمح مضخات ضخ قوة فواصل كثيرا جدا Cap-Djinet

وكجزء من هذا المشروع الرئيسي، سنقوم بتحليل هذه الظاهرة أساليب أكثر تقدما لتحليل الترددات التشخيصية يتكون العمل من تحليل إشارات الاهتزاز. بعد أخذ القياسات من التسارع وضعت على محامل رمح. يتم تنفيذ معالجة الإشارات يسمح هذا التحليل منا أن نفعل تحليل متقدمة لتحديد أسباب الفشل ويسمح التشخيص السليم عن تحلل إشارة الرقمية باستخدام الموجات

كلمات البحث: الفشل، والفشل رمح، مضخة عمودية، تحليل التردد، وإشارات، والتشخيص، والتحليل الموجات

Abstract:

Phenomena causing abnormalities in industrial machinery are numerous. These faults are definitely harmful and cause partial or total breakdown of the machine.

Vibration is one of those phenomena present in dynamic systems, especially in rotating machinery. It was reported that the shaft pumping pumps powerhouse Cap-Djinet breaks very frequently.

As part of this master project, we will analyze this phenomenon more advanced diagnostic methods for frequency analysis.

The work consists of an analysis of vibration signals. After Taking measurements from accelerometers placed on the shaft bearings. The digital signal processing is performed using MATLAB. This analysis allowed us to do advanced analysis to identify the causes of failure and allow a proper diagnosis by the decomposition of wavelet signal recovered in MATLAB.

Keywords: Failure, shaft failure, vertical pump, frequency analysis, signals, diagnosis, wavelet decomposition.

Résumé :

Les phénomènes causant les anomalies dans les machines industrielles sont nombreux. Ces défauts sont certainement nuisibles et entraînent la rupture partielle ou totale de la machine.

La vibration est un de ces phénomènes présent dans les systèmes dynamiques et plus particulièrement dans les machines tournantes. Il nous a été rapporté que l'arbre des pompes de pompage de la centrale électrique de CAP DJINET se rompt de façon très fréquente.

Dans le cadre de ce projet master, on se propose d'analyser ce phénomène par des méthodes plus avancées de diagnostic par l'analyse fréquentielle.

Le travail consiste à faire une analyse des signaux vibratoires. Après les prises de mesures à partir des accéléromètres placés sur les paliers de l'arbre. Le traitement numérique des signaux est effectué à l'aide du logiciel MATLAB. Cette analyse nous a permis de faire une analyse avancée pour l'identification des causes de défaillance et permettre un bon diagnostic par la décomposition en ondelette de signal récupéré sous MATLAB.

Mots-clés : Défaut, rupture d'arbre, pompe verticale, analyse fréquentielle, signaux, diagnostic, décomposition en ondelette.

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail à mes parents, Mes frères et sœurs et la famille HOUARI, CHABOU.

Mes amis proches Kadir, Achraf, Abdellah, Billal, Nadjib, MOH, Ghafour, Oussama, Idir, Wahab, Wahab, Nasri, Islam, Amine

Mes enseignants de département mécanique ENP.

Et les enseignants au long de mon cursus.

Mes camarades de classe.

A ceux que j'aime et qui m'aiment.

HOUARI Abdenour

Remerciements :

Je remercie ALLAH qui m'a aidé pour faire le présent travail.

Ce travail a été réalisé au sein du département mécanique, à l'école nationale polytechnique et mené sous la direction de Monsieur Saïd RECHAK, professeur à ENP, à qui j'exprime ma profonde gratitude pour la confiance qu'il m'a faite en me donnant la chance de travailler avec lui, même en dehors de ses heures de service pour qu'il me facilite la tâche. Je le remercie très chaleureusement pour l'intérêt qui a été porté de sa part à mon travail, pour son soutien permanent et ses précieux conseils, qui ont permis une progression concrète du travail.

Mes remerciements vont également à mes chers parents et frères qu'ELLAH les gardes, pour leur soutien moral.

Mes remerciements, touchent aussi toute la famille HOUARI, CHABOU.

Je tiens vraiment à remercier très chaleureusement Mohammed BOUFENAR, Docteur ENP, pour leur soutien et ses conseils.

Mes remerciements vont également à tous les enseignants de département mécanique ENP,

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur Yacine. BELKACEMI, Docteur au département mécanique ENP, pour l'honneur qu'il me fait en présidant le Jury de la soutenance, qu'il trouve ici l'expression de mes remerciements les plus vifs. Mes vifs remerciements vont aussi à Monsieur Dr. Hacène. BELHANECHÉ, pour avoir bien voulu porter une attention particulière à ce travail en faisant partie des examinateurs.

Je tiens à remercier A. BELMARZOUG, A. BENALLAL, O. MAKID, F. AMMAR, A. TOUAIBIA, O. BOUFENARA, et mes amis Kadir, Achref, Ghafour, Benouahlima, Nadjib, Islam, Amara et tous les collègues de département mécanique.

Je remercie tous ceux qui ont pu m'aider dans la réalisation de ce travail sans oublier les amis et les collègues pour leur présence à mes côtés tout au long de cette étude.

Table des matières

Résumé.....	4
Dédicace.....	5
Remerciement.....	6
Table des matières	7
Liste des figures	9
Introduction générale	10
CHAPITRE 1.....	11
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE APPROFONDIE.....	11
1. Introduction.....	12
2. Les cas d'étude [1].....	12
2.1. Vibration d'une fenêtre plate en verre [1].....	12
2.2. Equilibrage des rotors des groupes électrogènes [1].....	Erreur ! Signet non défini.
2.3. Vibration et son dans les fours d'impulsions [1].....	13
2.4. Vibration induite par le son [1].....	14
2.5. Vibration d'une machine de Résonance Magnétique Nucléaire [1].....	14
CHAPITRE 2.....	16
METHODES DE TRAITEMENT DES SIGNAUX NON-STATIONNAIRES	16
1. Introduction.....	17
2. Analyse dans le domaine temps-fréquence.....	17
2.1. Limitations de la transormation de Fourier- Inégalités d'Heisenberg.....	17
2.1.1. Dualité temps-fréquence.....	17
2.1.2. Principe d'incertitude de Heisenberg.....	18
2.2. La transformation de Fourier à court terme	18
2.2.1. La transformation de Fourier à fenêtre glissante	18
2.2.2. Limitations de la transformation de Fourier à court terme	19
2.3. La transformation de Wigner-Ville	20
2.4. LA TRANSFORMATION EN ONDELETTES	21
2.4.1. Principe de la décomposition en ondelettes.....	21
2.4.2. Transformation en ondelettes continues	22
2.4.3. Relation entre échelle et fréquence.....	24
2.4.4. Transformation en ondelettes discrètes	26
2.4.5. Choix des ondelettes	27
3. Diagnostic de la pompe WE par les méthodes fréquentielles	28

3.1. Avant intervention	28
3.1.1. Analyse spectrale	Erreur ! Signet non défini.
3.1.2. Analyse temps-fréquence	29
3.2. Après intervention	30
3.2.1. Analyse spectrale	30
3.2.2. Analyse temps-fréquence	31
4. Conclusion :	32
Conclusion Générale	33
Bibliographie	34

Liste des figures :

Figure 2.1 : exemple d'ondelette impaire

Figure 2.2 : ondelette mère complexe de Morlet, partie réelle impaire à gauche, partie imaginaire paire à droite

Figure 2.3: première étape pour la transformation en ondelette continue

Figure 2.4 : troisième phase pour la transformation en ondelette continue

Figure 2.5 : quatrième phase pour la transformation en ondelette continue

Figure 2.6 Ondelettes de HAAR de niveaux 0, 1 et 2

Figure 2.7 : signal temporel et son spectre avant intervention de la pompe WE

Figure 2.8 : transformé par ondelette de signal de la pompe WE avant intervention.

Figure 2.9 : signal temporel et son spectre après intervention de la pompe WE

Figure 2.10 : décomposition de signal par ondelette après révision de la pompe WE

Introduction générale

Les traitements des données vibratoires et leurs analyses afin de connaître les origines des défauts qui se manifestent dans les machines tournantes se fait par trois méthodes différentes : les méthodes temporelles ou valeurs scalaires (une dimension), les méthodes fréquentielles, et d'autres méthodes temps-fréquence multidimensionnelles, à l'exemple de l'imagerie dans le domaine du visible, des rayonnements ionisants (UV, X) ou encore des infrarouges (thermographie infrarouge), qu'on va traiter dans la présente étude.

Dans une première partie, une étude bibliographique approfondie sur plusieurs cas historiques de défaillance dans les systèmes dynamiques sont traités et analysés par l'analyse des vibrations est présentée, la deuxième partie est consacrée aux méthodes de traitement des signaux vibratoires en temps-fréquence.

La première partie comporte un chapitre, dont la synthèse bibliographique est présentée, plusieurs cas historiques ont été traitée, en basant sur l'analyse modale pour le calcul des fréquences propres et d'autre part par l'analyse (FFT) de signal.

La deuxième partie composée d'un chapitre dans lequel on présente les méthodes d'analyse temps-fréquence, en parlant des limites d'utilisation de la FFT pour les signaux non-stationnaire, on montre les divers méthodes de l'analyse temps-fréquence, en donnant les limites de chacune. L'analyse temporelle est basée sur l'étude de l'évolution d'une grandeur dans le temps, en étudiant les grandeurs statistiques telles que : la valeur moyenne, la valeur crête ou crête-à-crête, la valeur efficace et le Kurtosis. Pour l'analyse dans le domaine fréquentiel, la plus ancienne est l'analyse spectrale par la transformation de FOURIER (FFT) d'où ont découlé différentes techniques (densité spectrale de puissance, analyse d'enveloppe ou transformée de HILBERT). Le CEPSTRE représente un autre outil permettant de traiter des signaux soit de type impulsionnel soit de type modulé.

Les analyses dans le domaine temps-fréquence permettent de traiter les signaux non-stationnaires. Plusieurs méthodes ont présenté et chacune a ses avantages et inconvénients, la transformation de Fourier à fenêtre glissante (STFT), opération à partir de laquelle est déterminé le spectrogramme, la distribution d'énergie de WIGNER-VILLE constitue une méthode d'analyse assez utilisée en traitement du signal, et la distribution de CHOI-WILLIAMS, cette dernière s'aligne dans la classe des transformations bilinéaires. Enfin, la décomposition en ondelettes ou analyse en temps-échelle, figure dans cette troisième catégorie.

CHAPITRE 1 :

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE APPROFONDIE

1. Introduction :

Ce chapitre présente une étude bibliographique approfondie sur l'analyse des causes des pannes rencontrées dans l'industrie, en montrant les méthodes utilisées pour la détection des causes et les recommandations proposées pour les éliminer, en reposant sur l'analyse vibratoire par l'analyse modale, et le traitement de signaux récupérés.

2. Les cas d'étude : [1]

Plusieurs problèmes ont été rencontrés dans divers domaines :

2.1. Vibration d'une fenêtre plate en verre [1]

Un atrium dans un immeuble, au centre de l'atrium il y a une grande fontaine qui coule et autour de cette dernière il y a des salles de réunion. Chaque salle possède une grande fenêtre en verre d'environ 8 pieds de hauteur et 12 pieds de large.

Le problème qui se produit, c'est au niveau des grandes baies vitrées des plaques qui ont connu des niveaux élevés de vibrations. La fréquence de vibration était de 240 cycles / minute. Les planchers et les murs sont testés, et aucun niveau significatif de la vibration de 240 CPM n'a été observé dans cet endroit. Les portes sont testées également, et il a été constaté que les portes ne sont pas serrées, et ont montré également la présence de la vibration à cette fréquence. Il a été conclu que la vibration a affecté les éléments qui ont de grandes surfaces et de faibles valeurs de rigidité.

L'emplacement le plus évident pour la transmission d'impulsions de pression était dans la zone de traitement de l'air situé au sommet de l'édifice. La résolution du problème est survenu lors de la marche par un gestionnaire d'air et en remarquant que la conduite des serpentins de refroidissement dans la conduite d'évacuation du ventilateur vibre. Un spectre a été pris sur le tuyau, il y a une coïncidence avec la vibration de la fenêtre à 240 CPM.

Lorsque ce gestionnaire d'air a été coupé, les vibrations sur les fenêtres ce sont immédiatement arrêtées. Lorsque le ventilateur a été démonté, on a remarqué que les vis qui reliaient la bobine de chauffage ont été défaillantes. Lorsque la bobine a été analysée, sa fréquence naturelle était 240 CPM, Sans les supports. Lorsque le ventilateur est en fonctionnement, une large énergie d'écoulement excite cette fréquence naturelle et fait vibrer la bobine à 240cycles / minute.

La bobine d'environ 6X6 pieds, génère une quantité importante d'énergie de pulsation d'air. Les impulsions sont introduites directement dans l'atrium où ils excitent les fenêtres.

Les fenêtres avaient une très grande surface avec un faible de rigidité fait que celles ci ont des niveaux élevés de vibrations.

2.2.Equilibrage des rotors des groupes électrogènes [1]

Seul celui qui a déjà travaillé sur une ligne d'extraction peut apprécier la difficulté de ces machines. Les grandes lignes de traînée sont utilisées pour enlever le sol. Parfois, la couche de sol est de 100 pieds ou plus. Les lignes de traînée peuvent peser de 5000 à 7000 tonnes, et leurs seaux peuvent retirer plus de 100 yards cubes à la fois. Généralement, il existe plusieurs groupes électrogènes à moteur qui génèrent un courant continu pour la traînée et le levage des moteurs. Cette ligne de traînée particulière avait 5 grands groupes électrogènes.

Chaque ensemble moteur-générateur est composé d'un grand moteur synchrone, deux générateurs sur un côté du moteur et trois générateurs de l'autre côté. Tous les moteurs et les générateurs étaient solidement couplés et il n'y avait qu'un seul palier par générateur. Etant donné que les moteurs sont synchrones, ce qui signifie que toutes les unités fonctionnent à la même vitesse de 1200 tours par minute. Ce qui complique les choses, c'est que tous les ensembles moteur-générateurs (MG) sont situés sur le même pont métallique. Il y a 30 éléments rotatifs (cinq moteurs synchrones et 25 générateurs) fonctionnant sur un pont métallique, tournant à la même vitesse de 1200 RPM.

Le problème de vibration se manifeste à 1200 cycles par minute. La structure entière vibre à 1200 CPM. Cependant, avec un peu de recherches, il a été constaté que la vibration est plus élevée sur l'un des ensembles MG. Des efforts sont faits pour équilibrer cette unité. La valeur la plus élevée était de 0.27mm dans la direction verticale sur le générateur de moteur.

Les niveaux de vibrations ont diminué dans la direction horizontale et verticale. Pour tenter de simplifier le problème, deux des générateurs sont découplés du moteur. Même avec cette configuration, la vibration du générateur était encore de 0.2mm. Donc il est nécessaire d'équilibrer ce rotor.

La solution est d'ajouter la quantité nécessaire de poids à la position angulaire appropriée sur le rotor du moteur synchrone. L'équivalent de 1.4 Kg est ajouté à un rayon de 750 mm sur le moteur. Lorsque cela a été fait, le niveau de vibration sur l'ensemble de l'unité a diminué.

2.3. Vibration et Son dans les fours d'impulsions [1]

Un bâtiment a connu des niveaux inacceptables de son et de vibration. Les problèmes sont liés aux trois fours d'impulsions de chauffage du bâtiment. Les fours sont situés dans le sous-sol.

Les spectres de vibrations et le bruit sont pris dans les zones des sources du problème (les bureaux). La fréquence primaire à la fois les spectres de bruit et les vibrations est environ 37 Hz, ce qui coïncide à la fréquence d'impulsion de mise à feu des fours.

Les niveaux sonores et de vibrations les plus élevés sont localisés à côté des bureaux, canalisés par une tour carrée creuse (cage d'escaliers). Dans la partie qui se trouve au niveau du toit, il y a une fenêtre circulaire de 3 pieds de diamètre. Cette fenêtre était directement en face aux cheminées d'échappement des fours. On a découvert que cette fenêtre vibrait avec des niveaux extrêmement élevés de vibrations à la fréquence du four.

Un test de résonance a été effectué, et a montré que la fréquence naturelle de la fenêtre était très proche de la fréquence de l'impulsion d'allumage des fours. La hauteur de la tour ouverte était d'environ 30 pieds, ce qui correspond à la longueur d'onde de la fréquence de 37 Hz.

Deux mesures sont prêtes pour résoudre le problème. La première était de mettre silencieux sur les lignes de combustion. La seconde était d'augmenter la hauteur des cheminées à bien au-dessus de la fenêtre dans la tour, de sorte qu'il ne serait pas excité.

2.4.Vibration induite par le son [1]

Après l'installation d'un convoyeur rotatif de coulée dans une fonderie, les vibrations des parois et en particulier sur les fenêtres de la salle de contrôle de la fonderie a connu des niveaux élevés de vibrations. Les endroits qui ont connu les plus hauts niveaux de vibration sont les fenêtres de la salle de contrôle. Un tracé de la vibration mesurée sur les fenêtres de fonderie a montré un taux de 0.9mm.

Une fréquence de 885 cycles par minute était prédominante dans le spectre. La vibration 885 CPM sur les fenêtres est trouvée également sur les murs de tous les bureaux de la fonderie. Cette fréquence correspond à la fréquence de vibration d'un grand transporteur rotatif de coulée. Cependant, des mesures de vibration à côté du convoyeur sont faibles car le convoyeur est monté sur des ressorts et des absorbeurs dynamiques.

L'autre test consiste à prendre des mesures avec un microphone.

La sortie du microphone a été analysée sur un analyseur FFT et on a constaté que le niveau sonore à 885 CPM (14,75 Hz) est plus de 100 dB. Ce niveau est supérieur à la gamme de l'audition normale pour les humains, mais ne semble pas mauvais. Le test final est d'effectuer une vérification de résonance sur la fenêtre. Un tracé de la réponse de l'une des fenêtres de la salle de contrôle a montré que la fréquence naturelle de la fenêtre est très proche de la fréquence des ondes de pression émises par le convoyeur de coulée rotatif.

Le convoyeur rotatif est la source de vibration. Cependant, la voie de transmission est dans l'air plutôt que par la structure. Les fenêtres étant en résonance avec la fréquence de fonctionnement du convoyeur.

Il est recommandé que les fenêtres soient munies de croisillons pour déplacer leurs fréquences naturelles loin de la fréquence de fonctionnement du convoyeur. Un boîtier insonorisant avec des rideaux de masse doit être construit autour du convoyeur.

2.5.Vibration d'une machine de Résonance Magnétique Nucléaire [1]

Un instrument de résonance magnétique nucléaire (RMN) servant à tester des échantillons chimiques donne de mauvais résultats.

Une signature prise à la sonde de l'unité RMN a montré un niveau de $8,190 \text{ mm/s}^2$ à une fréquence de 26 Hz. Le sol à côté de l'unité RMN a connu un niveau vibratoire de 1.550 mm/s^2 à la même fréquence. Les lectures signifient que la vibration de l'appareil RMN est 5,2 fois plus élevée que le niveau mesuré sur le sol. Pour déterminer la cause de l'amplification, un contrôle de la résonance a été effectué. La fonction de transfert a clairement montré un pic à 26 Hz, ce qui indique que l'unité est en résonance à la fréquence de 26Hz.

Il a été conclu que les ventilateurs dans une salle de Contrôle près du troisième étage ont provoqué la résonance à 26 Hz. Il a été recommandé que l'unité RMN doit être installée sur des isolateurs avec un rendement de 95% pour l'atténuation de la vibration.

La réduction de 95% a donné lieu à des niveaux vibratoires inférieurs suite à l'installation des isolateurs, ce qui a rendu l'unité RMN plus performante.

CHAPITRE 2

METHODE DE TRAITEMENT DES SIGNAUX NON-STATIONNAIRES

1. Introduction

Les signaux non-stationnaires, ne peuvent être correctement traités par les méthodes usuelles d'analyse spectrale (transformation de Fourier) : en effet, la transformation de Fourier effectue une transposition de l'espace temps vers son espace dual des fréquences et perd de ce fait toutes les informations sur le séquençement temporel du signal. Ainsi, grâce à une analyse spectrale classique sur le signal, on pourra déterminer si telle ou telle note a été jouée mais on ne saura, en aucun cas, préciser à quel moment celle-ci l'a été. Pour remédier à ces problèmes, sont apparus plusieurs outils d'analyse : le plus simple est sans doute la transformation de Fourier à court terme (Analyse de Fourier par fenêtre glissante h sur le signal) [2,3] qui découpe le signal $z(t)$ en tranches d'analyse (largeur de la fenêtre $h(t)$) sur lesquelles on fait l'hypothèse de stationnarité locale et sur lesquelles on effectue une analyse de Fourier classique.

2. Analyses dans le domaine temps-fréquence

Une transformation de Fourier cache l'information sur le temps : elle donne le nombre de fréquences contenues dans le signal mais en tait l'instant d'émission.

Une telle analyse n'est donc pas adaptée aux signaux qui changent brusquement et de manière imprévisible. Pourtant, ces changements contiennent souvent l'information la plus intéressante dans le traitement du signal. L'inconvénient majeur de la précédente technique est son incapacité à traiter ces signaux non-stationnaires, pourtant apparaissant fréquemment lors de défauts sur les machines. C'est ainsi que furent développées les méthodes visant à se pencher à la fois sur la variation dans le temps et sur les fréquences du signal.

Les analyses dans le domaine temps-fréquence permettent de représenter dans ces deux espaces les signaux non stationnaires. Dans cette catégorie, à part la transformation de Fourier à fenêtre glissante (STFT), opération à partir de laquelle est déterminé le spectrogramme, la distribution d'énergie de WIGNER-VILLE constitue une méthode d'analyse assez utilisée en traitement du signal. Avec la distribution de CHOI-WILLIAMS, cette dernière s'aligne dans la classe des transformations bilinéaires. Enfin, la décomposition en ondelettes ou analyse en temps-échelle, largement développée ici, figure dans cette troisième catégorie.

Ce chapitre décrit les principes et applications de toutes ces techniques de traitement dans le cas de l'analyse vibratoire des machines.

2.1. Limitations de la transformation de Fourier - Inégalités d'Heisenberg

2.1.1. Dualité temps-fréquence

Le calcul de $X(f)$ nécessite la connaissance de toute l'histoire temporelle du signal $x(t)$.

Réciproquement, la relation :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{2i\pi ft} df \quad 1$$

fait remarquer qu'à un instant t donné, la valeur du signal est caractérisée par une combinaison linéaire de signaux complètement délocalisés dans le temps (ondes éternelles). Cela peut être dans certains cas intéressants (analyse de signaux stationnaires, signaux monochromatiques, régime permanent. . .) mais ne reflète pas le sens physique du phénomène. Ex : les signaux brefs ou transitoires nuls en dehors d'un intervalle temporel. La nullité des valeurs du signal en dehors de son intervalle est bien sûr mathématiquement rendue par la transformation de Fourier mais d'une manière artificielle : elle correspond au résultat de la superposition d'une infinité d'ondes virtuelles qui interféreraient entre elles pour se détruire ou s'annuler. Sur le support où le signal est nul, on aura donc, non pas une superposition de signaux nuls mais une superposition de signaux non nuls qui interfèrent pour s'annuler, ce qui est en contradiction avec le fait que le signal n'existe pas.

2.1.2. Principe d'incertitude de Heisenberg

Le principe d'incertitude de Heisenberg vient de la mécanique quantique et décrit l'impossibilité par exemple de connaître avec précision à la fois la position et la vitesse d'une particule. Du fait de la dualité des espaces temps et fréquence, il existe un principe d'incertitude qui exprime le fait que l'on ne peut connaître avec suffisamment de précision la localisation à la fois en temps et en fréquence d'un signal : un signal de très brève durée possède une densité spectrale très étendue et vice versa. Ce principe est énoncé par la relation:

$$\sqrt{\Delta t^2} \sqrt{\Delta f^2} \geq \frac{E_x}{4\pi} \quad 2$$

et montre qu'aucun signal ne peut être caractérisé à la fois par une durée $\sqrt{\Delta t^2} = 0$ et une largeur de bande $\sqrt{\Delta f^2} = 0$

2.2. La transformée de Fourier à court terme

La limitation due au fait de décomposer un signal sur une base de signaux non localisables étant un handicap, la solution la plus simple a été d'effectuer une analyse de Fourier non pas sur la totalité du signal mais sur une portion du signal. Cette solution est très populaire et est connue sous le nom de transformation de Fourier à court terme.

2.2.1. La transformation de Fourier à fenêtre glissante

Il s'agit de décrire de façon la plus précise possible une partie du signal, en termes de temps et de fréquence. L'idée consiste à procéder à un fenêtrage glissant en tronquant le signal de façon à ne le considérer que sur un intervalle fini. Cette opération de troncature se traduit mathématiquement par la convolution avec le sinus cardinal, transformée de Fourier de la fonction « porte ».

La transformation dite « de Gabor » consiste à décomposer et analyser un signal en fréquence morceau par morceau. Pour cela, on utilise une fenêtre glissante centrée autour d'un temps b qui détermine une zone contenant des oscillations. C'est ainsi qu'on parle d'Analyse de Fourier à fenêtre glissante ou de STFT (Short Time Fourier Transform).

Le signal $x_{\Pi,b}(t) = x(t)w(t-b)$ résultant du fenêtrage temporel de fonction $w(t)$ possède un spectre :

$$X_{\Pi,b}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_{\Pi,b}(\theta) e^{-i2\pi f\theta} d\theta \quad 3$$

Ceci définit la transformée de Fourier à fenêtre glissante, permettant un accès direct à la relation entre le temps et la fréquence.

2.2.2. Limitations de la transformation de Fourier à court terme

On remarque ainsi que la largeur temporelle et fréquentielle de la transformée de Fourier à court terme conditionne la finesse de l'analyse (bonne résolution temporelle ou bonne résolution fréquentielle).

À cause des relations d'incertitude (produit $\Delta t^2 \Delta f^2$ borné inférieurement), il est impossible d'obtenir simultanément les deux. L'analyse temps-fréquence s'effectue en décomposant le signal sur des atomes qui pavent le plan temps-fréquence avec une fenêtre de surface

$\sqrt{\Delta t^2} \sqrt{\Delta f^2}$, constante avec Δt^2 constant et Δf^2 constant. La fenêtre qui minimise à la fois l'encombrement temporel et fréquentiel est la gaussienne.

Cependant, comme largeur de fenêtre et bande fréquentielle correspondante sont inversement proportionnelles, de hautes résolutions à la fois dans le domaine du temps et de la fréquence sont impossibles. C'est la principale faiblesse de ce type de transformation.

L'intérêt de cette représentation de l'énergie du signal simultanément en temps et en fréquence a été largement développé par [4].

Usuellement, le terme « spectrogramme » est réservé pour la présentation selon une distribution de la puissance de la STFT. Dans le cas général, cette dernière transformée s'écrit pour un signal temporel $x(t)$:

$$STFT_x(\tau, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot h^*(t-\tau) e^{-i2\pi \nu t} dt \quad 4$$

Avec le conjugué de la fenêtre spectrale $h^*(t-\tau)$ Le produit $|STFT_x(\tau, \nu)| X |STFT_x(\tau, \nu)|^*$ donne alors le spectrogramme. Interprété comme la distribution de l'énergie dans le domaine fréquentiel à tout instant, il a pu être utilisé par [5] et [6]

Pour une détection précoce de défaut d'engrenage. L'auteur a montré que la fenêtre gaussienne convient très bien pour ce calcul, car la représentation qui en résulte est plus facile à interpréter.

Par l'étude de la phase de ce spectrogramme, [7] a démontré l'utilité et l'acuité de ce nouvel outil dans le cadre d'un diagnostic vibratoire.

De manière générale, la méthode faisant appel à une distribution en temps-fréquence convient pour des signaux transitoires ou non-stationnaires.

2.3. La transformation de Wigner-Ville

La transformée de Wigner-Ville d'un signal déterministe est définie par :

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \cdot x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad 5$$

Il s'agit de la transformée de Fourier de la fonction de covariance centrale [8]. Il est à souligner que $W_x(t, f)$ est une grandeur réelle bidimensionnelle.

Le spectrogramme est une version lissée de la transformée de Wigner-Ville :

$$Sp_x(t, f) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} x(u) \cdot x^*(u - f) e^{-i2\pi fu} d\tau \right|^2 \quad 6$$

Il peut constituer un bon outil de diagnostic.

[9] a démontré l'efficacité de cette transformation de Wigner-Ville dans le cas d'une distribution d'énergie du signal dans les domaines temporel et fréquentiel. L'étude des comportements et le diagnostic des défauts sur les machines tournantes peuvent être réalisés grâce à cette méthode. [10] s'est appliqué à détecter les réponses vibratoires de robots en fonctionnement simultané. De bons résultats ont pu ressortir à travers une combinaison de la distribution de WIGNER-VILLE avec des techniques de corrélation bidimensionnelle.

Les applications de cette méthode s'étalent sur plusieurs domaines. Elle fut la base de l'élaboration d'un programme de diagnostic de systèmes et de suivi vibratoire de la pompe de refroidissement de réacteur au sein d'une centrale nucléaire. Avant d'être opérationnel, ce logiciel a été testé par [11] sur une unité expérimentale simulant les défauts tels que désalignement, flexion d'arbre ou frottement dans les paliers. Le spectre fourni par transformée de WIGNER-VILLE a facilité l'analyse des signaux.

Dans certains cas, on préfère utiliser des transformations séparables avec lesquelles on peut influencer séparément sur le temps et la fréquence. C'est la distribution de Pseudo Wigner-Ville lissée :

$$PW_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} w_x(u, v) X g(u - t) X H(v - f) dudv \quad 7$$

Où $g(u - t)$ est une fonction de fenêtrage (HAMMING, HANN, ...) et $H(v - f)$ la fonction de transfert du filtre passe-bande.

C'est un outil efficace appliqué au cas où il y a une superposition des phénomènes temporels (événements ponctuels de courte durée) et fréquentiels (raies stables en fréquence), dans la catégorie des signaux non stationnaires. Il offre un compromis satisfaisant pour une localisation simultanée d'impulsions temporelles et de raies spectrales. [12] a utilisé avec succès cette technique dans l'extraction de la signature vibratoire sur un moteur diesel à pistons. Ce type d'installation possède certaines particularités. En effet, il y apparaît des excitations par chocs, des propriétés de transfert variables dans le temps ainsi que des réponses aléatoires et in-stationnaires.

Cette version lissée de la distribution de Pseudo Wigner-Ville peut aussi servir dans la détection des défauts d'engrenage [13]. Pour cela, trois types de défauts ont été simulés : dent cassée, roue fissurée et arbre usé. Par ailleurs, une comparaison avec les résultats sur les signaux acoustiques a permis de conclure que ces derniers peuvent aussi fournir d'importants éléments de diagnostic.

2.4.LA TRANSFORMATION EN ONDELETTES

Une Ondelette est une oscillation en forme d'onde, d'une durée limitée et dont la représentation graphique est telle que les aires positive et négative sont, égales (moyen nulle). On parle aussi de fenêtre « en accordéon ».

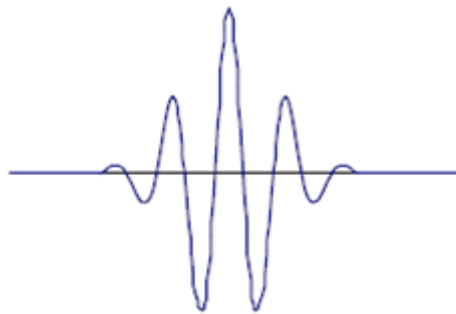


Figure 2.1 : exemple d'ondelette impaire

2.4.1. Principe de la décomposition par ondelettes

L'idée de base de la transformation en ondelettes consiste à utiliser des fenêtres de pondération de fonction réelle à deux paramètres a et b de la forme $W_{a,b}(t)$. Une telle fonction se caractérise par :

- Le facteur d'échelle a : il mesure l'étirement ou la contraction de l'ondelette. Une faible valeur de a signifie une ondelette contractée temporellement,
- Le facteur de translation (ou la position) b est tel qu'en déplaçant son support d'analyse, on déplace l'ondelette dans le temps.

Cette méthode permet en particulier d'effectuer des études localisées sur une partie du signal. Des aspects particuliers caractérisant les phénomènes non-stationnaires, tels que

discontinuités ou petites singularités dues généralement à des fluctuations d'alimentation..., peuvent être révélés par l'analyse par ondelettes.

Les applications de cette méthode sont multiples. Même dans le domaine de l'écoulement turbulent d'un fluide, [14] a étudié son application dans le but d'analyser la fluctuation de vitesse dans le sillage en aval d'un corps solide.

Pour cela, une combinaison avec la technique de démodulation par transformée de Hilbert fut utilisée.

2.4.2. Transformation en ondelettes continues

De l'analyse de Fourier ressortent des coefficients qui, multipliés par des sinusoides de fréquences appropriées, permettent de reconstituer le signal initial.

Pour l'analyse par ondelettes, les coefficients d'ondelettes (liés au type d'Ondelette utilisé) pour une transformation sont déterminés par :

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot w_{a,b}(t) dt \quad 8$$

$x(t)$ étant le signal temporel, $w_{a,b}(t)$ la fonction de base de l'Ondelette. Tout se déroule comme si on projetait le signal sur une base des fonctions analysantes.

Ces dernières sont de la forme :

$$w_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} w^* \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad 9$$

Et sont construites à partir de la fonction génératrice (en général complexe) appelée ondelette mère. La figure suivante montre l'exemple de l'Ondelette de MORLET, constituée de sinus modulé par une gaussienne :

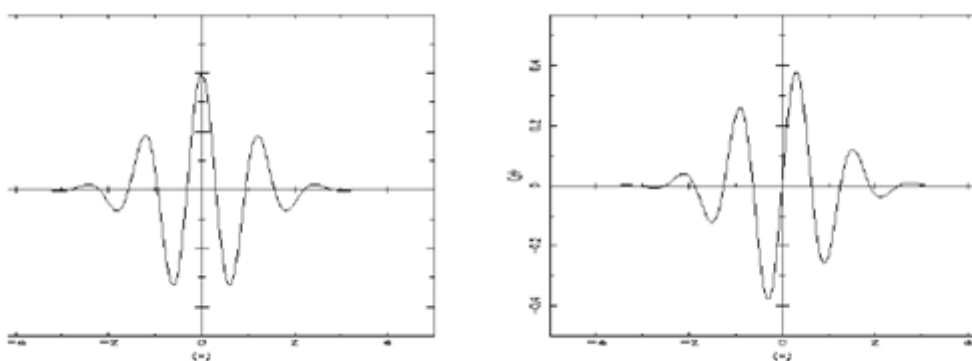


Figure 2.2 : ondelette mère complexe de Morlet, partie réelle impaire à gauche, partie imaginaire paire à droite

Dès lors, une transformée en ondelettes continues s'écrit :

$$TO_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot w^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad 10$$

La transformation inverse permet de reconstruire le signal original :

$$x(t) = k \cdot \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} w \left(\frac{t-b}{a} \right) \cdot TO_x(a, b) \cdot da \cdot db \quad 11$$

Le scalogramme, défini par le carré du module de la transformée en ondelettes continues, est très utilisé dans le diagnostic de défauts :

$$SG_x(a, b) = |TO_x(a, b)|^2 \quad 12$$

Qui n'est rien d'autre que la corrélation locale entre la fonction analysante et le signal.

La différence par rapport à la transformée de Fourier est l'utilisation de déformation (dilatation ou contraction) du motif de l'Ondelette originale. La notion de fréquence laisse la place à la notion d'échelle de dilatation (d'où le nom d'analyses multi échelles ou de représentation temps-échelle).

A titre d'exemple, les ondelettes de MORLET et le « chapeau mexicain », de type à faible oscillation, ont été étudiées par [15]. En raison de sa parité, cette catégorie donne une décomposition temporelle. Elles peuvent alors convenir pour la détection de caractéristiques de courte durée, de faible amplitude, et masquées dans du bruit.

Pour certaines familles, la décomposition est unique (il n'y a pas de redondance) car les coefficients d'ondelettes sont indépendants : on parle d'orthogonalité de ces ondelettes, lesquelles forment une base de fonctions orthogonales.

La procédure permettant d'arriver à la transformation en ondelettes continues est décrite comme suit :

1. choisir une Ondelette d'analyse et la comparer à une portion au début du signal,

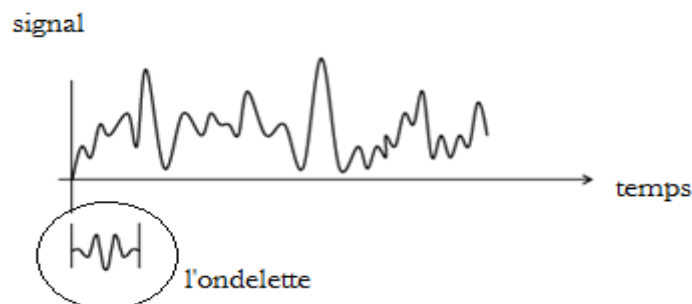


Figure 2.3: première étape pour la transformation en ondelette continue

2. calculer le coefficient d'Ondelette C représentant la valeur de la corrélation entre l'Ondelette et le signal,
3. déplacer l'Ondelette et refaire les opérations 1 et 2. Jusqu'à balayer intégralement le signal,

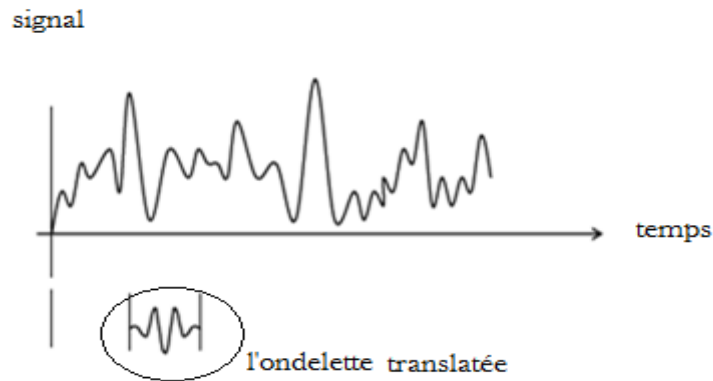


Figure 2.4 : troisième phase pour la transformation en ondelette continue

4. varier l'échelle de l'Ondelette et répéter les opérations 1 à 3. Puis les étapes 1 à 4. Pour toutes les échelles.

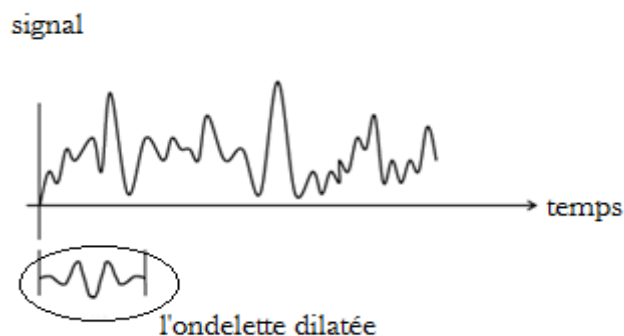


Figure 2.5 : quatrième phase pour la transformation en ondelette continue

A la fin, on obtient les coefficients d'ondelettes aux différentes échelles et positions.

2.4.3. Relation entre échelle et fréquence

Le terme « échelle » désigne la corrélation entre la taille de l'Ondelette et celle des composantes que l'on recherche.

De manière générale, les ondelettes étendues (grandes échelles) conviennent pour voir la tendance du signal aux basses fréquences, autrement dit les composantes de longue durée. En effet, étirer les oscillations fait baisser leur fréquence. Par contre, celles qui sont fines ou contractées (petites échelles) permettent de se concentrer sur les hautes fréquences

correspondant aux composantes transitoires en général. Elles poursuivent les variations rapides et fournissent des informations sur le temps d'apparition d'un évènement.

C'est ainsi que les ondelettes s'adaptent automatiquement aux différentes composantes du signal.

L'avantage de la multi-résolution est mis en évidence dans la localisation de composants de courte durée dans le signal. Cette qualité a été mise à profit par [16] pour surveiller l'état d'une boîte de transmission à engrenage sur un hélicoptère, particulièrement les défauts générant des phénomènes transitoires. Pour cela, un algorithme de calcul a été élaboré.

Cependant, les outils numériques présentent souvent des faiblesses en termes de résolution et de vitesse. C'est pourquoi [17] a proposé un algorithme de calcul rapide des ondelettes en utilisant un filtre à réponse impulsionnelle infinie. En combinaison avec l'auto-corrélation, l'outil a été appliqué avec succès pour des analyses à fines bandes fréquentielles et à fréquence centrale définie, grâce au spectre de puissance de l'Ondelette.

La combinaison de différentes techniques s'avère souvent pertinente. [18] a conjugué avantageusement les transformations de Fourier et en ondelettes pour caractériser des défauts naissants et bien localisés sur les paliers à roulement.

Si la plupart des travaux portent sur la représentation des ondelettes en amplitude, le plan des phases (pour les ondelettes complexes) peut aussi être sondé. [19] a alors combiné les deux espaces pour évaluer l'état des engrenages. Il a en outre introduit la représentation polaire, très intéressant pour le repérage précis de la dent usée. Par la suite, [20] a poursuivi ces travaux en ajoutant un autre facteur : vitesse de rotation variable. Pour cela, un logiciel spécifique a été développé et testé sur un réducteur à engrenage droit à denture hélicoïdale. Des améliorations ont été trouvées.

[21] a démontré l'efficacité des ondelettes par rapport à d'autres techniques, en étudiant des roulements comportant des défauts de piqûres sur les pistes et cela pour de faibles charges radiales. Les exemples s'étendent vers d'autres domaines, tels que les turbomachines. [22] a ainsi confirmé la pertinence de la méthode en diagnostiquant les défauts sur une turbine à gaz. [23] a pu analyser les vibrations non-stationnaires dans les mécanismes à cames sur les machines d'emballage automatique.

Par les ondelettes, il est aussi possible de dé-bruiter un signal. En utilisant l'Ondelette élémentaire de MORLET et s'aidant de l'estimation de vraisemblance maximale à partir de la densité de probabilité d'un signal impulsionnel, [24] est parvenu à détecter les impulsions en analyse vibratoire même en cas de faible rapport signal sur bruit.

Mais la technique ne s'applique pas exclusivement aux signaux vibratoires. En simulant des défauts classiques (fissure et rupture de dent) sur des systèmes à engrenages, [25] a montré que les signaux acoustiques permettent tout aussi bien de déceler par avance ces anomalies.

Beaucoup d'études ont été menées surtout en traitement d'images, jusque dans les domaines de la Géophysique : mouvements des vagues océaniques, des fronts atmosphériques, convections tropicales [26].

2.4.4. Transformation en ondelettes discrètes

Facteur d'échelle et pas de translation étant des réels, la transformation en ondelettes continue est redondante. Etant parcouru continûment, l'espace temps- fréquence est sur-analysé. En outre, la transformation occasionne un volume important de calculs, vue la quantité des coefficients. C'est pourquoi on a créé la transformation en ondelettes discrète dans laquelle on ne translate et dilate l'ondelette que selon des valeurs discrètes.

En général, le facteur de dilatation a est une puissance de 2. C'est comme si on procède par échantillonnage avec des échelles égales à des puissances de 2. Le nombre de coefficients est ainsi considérablement réduit.

La plus simple Ondelette orthogonale est celle de HAAR, représentée par une fonction rectangulaire (figure 2.6).

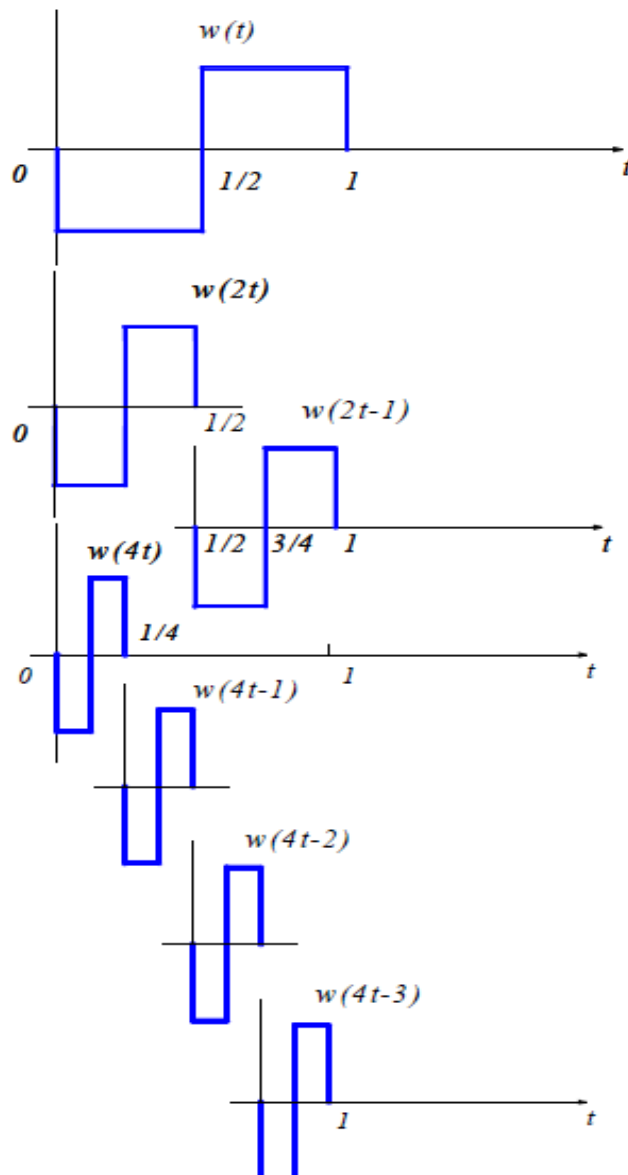


Figure 2.6 Ondelettes de HAAR de niveaux 0, 1 et 2

[27] a utilisé la transformée de HAAR pour le diagnostic des défauts sur les machines tournantes. Pour cela, il s'est basé sur le pic d'impulsion comme indicateur. En raison de sa simplicité, la transformation de HAAR a en outre été utilisée dans d'autres domaines. [28] a

étudié les machines-outils avec cette méthode. L'auteur a utilisé la transformée en ondelette discrète pour prévenir la cassure de l'outil fraise par mesure du courant électrique du moteur d'entraînement.

Beaucoup de travaux ont été faits sur l'application des ondelettes discrètes. [29] l'a utilisée pour le diagnostic de défauts de moteur à combustion interne. Une combinaison avec le réseau de neurones, permettant la sélection des caractéristiques du spectre d'énergie et la classification des défauts, fut mise en œuvre. Pour la décomposition, les fonctions d'ondelettes de DAUBECHIES

«db4», «db8» et «db20» ont été utilisées. Puis les caractères résultants ont été employés en vue de reconnaissance des défauts par un réseau de neurones.

De même, le cas des défauts d'engrenages a été traité par [30-2]. Il a mis à profit l'extraction des caractères du signal par transformation en ondelettes discrètes avant de faire appel à la méthode de l'inférence par logique floue pour l'identification des défauts.

La transformée en ondelettes discrètes a été aussi utilisée par [31] dans l'analyse vibratoire de structures, à l'exemple d'une corde non homogène. Il fut démontré que même un faible défaut peut être localisé grâce aux changements dans les coefficients d'ondelettes du signal vibratoire.

2.4.5. Choix des ondelettes

En raison de sa forme, l'Ondelette de MORLET se prête naturellement à l'analyse de signaux de type réponses impulsionnelles à un choc [32]. En outre, selon [33], ce type d'Ondelette est aussi bien adapté pour détecter de brusques changements (discontinuités et impulsions) dans les signaux vibratoires venant d'engrenages.

En tout cas, il importe de se pencher sur deux facteurs : le système de représentation (continu ou discret) et les propriétés des ondelettes, notamment trois caractéristiques essentielles :

- Le nombre de moments nuls : plus il y en a, plus l'Ondelette oscille. S'il n'y en a qu'un seul, l'Ondelette ne voit pas les fonctions linéaires. S'il en a deux, elle est aveugle aux fonctions quadratiques... En réalité, l'effet du nombre de moments nuls est de concentrer l'information du signal dans quelques coefficients. Par exemple, selon I. DAUBECHIES, deux moments nuls suffisent pour l'analyse numérique des images,
- La régularité (Ondelette lisse ou non) qui agit sur la qualité de la reconstruction du signal,
- La sélectivité fréquentielle : une Ondelette est constituée d'un mélange de fréquences indiqué par sa transformée de Fourier. Les coefficients d'ondelettes se réfèrent à ce mélange. Ainsi, plus cette gamme de fréquences est étroite, plus l'Ondelette est sélective en fréquence : elle peut découper en fréquence le signal avec netteté.

Dans le choix de la fonction d'ondelettes, quatre aspects doivent être considérés :

- L'orthogonalité : suite à une redondance aux larges échelles, le spectre d'ondelettes est fortement corrélé aux positions temporelles adjacentes. La non orthogonalité est alors admise en cas de variations lisses et continues dans le signal,
- Fonction mère complexe ou réelle : une fonction complexe donnant des informations à la fois en amplitude et en phase, convient mieux pour capturer des oscillations. Une fonction réelle ne fournit qu'une composante et peut donc s'utiliser pour isoler des discontinuités ou des pics,
- Largeur (définie par le temps nécessaire à l'amplitude pour augmenter de e) : une fonction étroite en temps aura une bonne résolution temporelle mais pauvre en fréquence et vice-versa,
- Forme : elle devra refléter le type de caractéristiques contenues dans le signal. Pour des sauts aigus ou des peignes de pics, une fonction rectangulaire (HAAR) conviendra, pour des variations plus douces, une fonction similaire (cosinus amorti) sera choisie.

3. Diagnostic de la pompe WE par les méthodes fréquentielles :

Dans cette partie on s'intéresse de diagnostiquer l'état de la pompe WE de la centrale thermique par les méthodes fréquentielles, on se basant sur le transformé de FOURRIER, puis on fera une introduction à l'analyse temps-fréquence pour améliorer le diagnostic, par la méthode des ondelettes.

3.1. Avant intervention : les mesures sont prêtes avant l'intervention où les niveaux vibratoires étaient élevés.

3.1.1. Analyse spectrale :

Pour faire le diagnostic de la pompe le signal temporel ne donne pas beaucoup d'informations pour connaître les causes de défaillance, pour cela on est obligé de passer à l'analyse spectrale pour bien diagnostiquer l'état de santé de la pompe, et voir les fréquences d'apparition de chaque panne.

Cette figure montre le signal temporel et son spectre fait dans MATLAB, de la pompe WE dans le palier 1Ha, avant intervention où les niveaux vibratoires étaient élevés et dépassent le seuil normalisé, la date 02/09/2015.

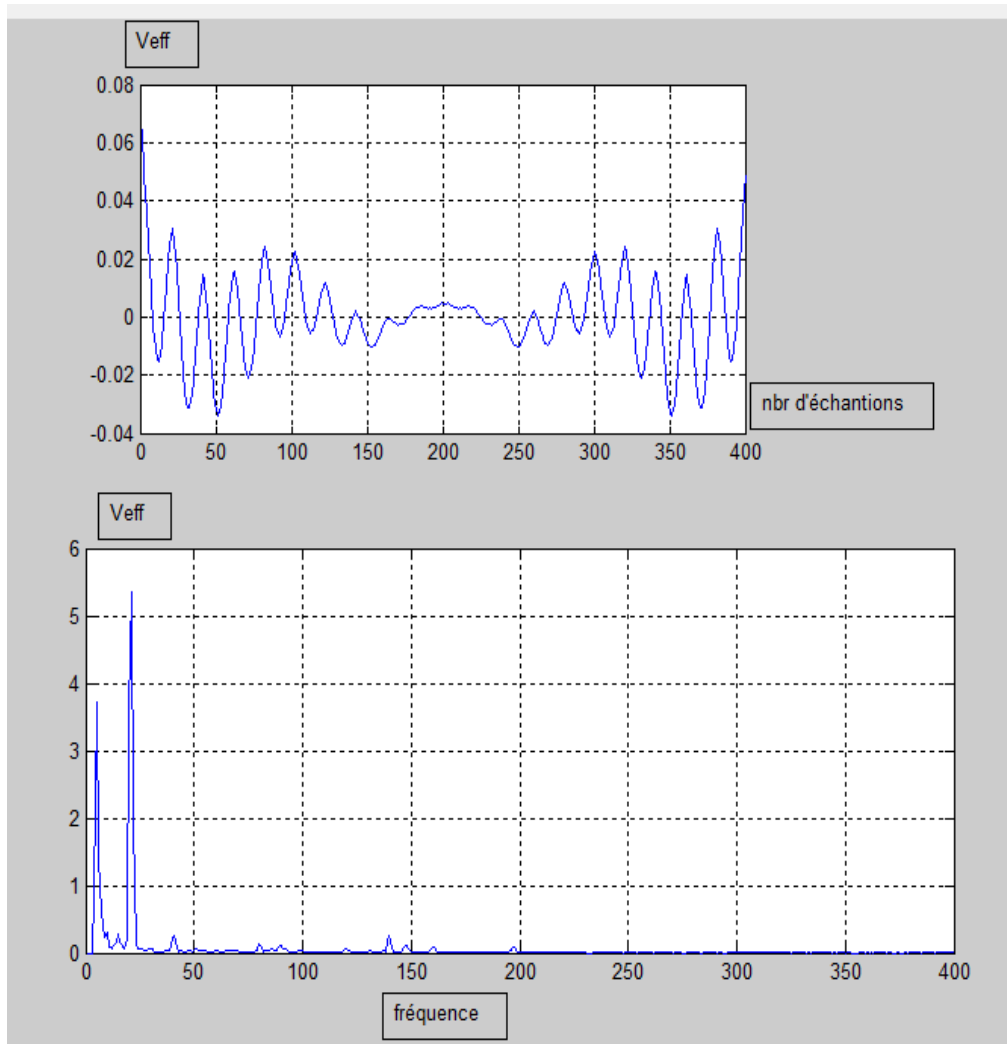


Figure 2.7 : signal temporel et son spectre avant intervention sur la pompe WE

Pour le signal temporel, l'analyse se fait par le calcul des paramètres statistiques comme le RMS, Crête, Kurtosis, pour le suivi de ces paramètres.

Pour l'identification précise de la cause des pannes on utilise l'analyse spectrale par le transformé de FOURRIER de signal temporel.

L'interprétation de ce spectre est faite dans le projet fin d'étude [34].

L'analyse spectrale est un outil très puissant pour les signaux stationnaire, par contre pour les signaux non-stationnaire on ne peut pas faire le diagnostic par le transformé de FOURRIER simple mais par d'autre méthodes dans le domaine temps-fréquence.

3.1.2. Analyse temps-fréquence :

Le problème de TF est son manque de résolution temporelle, cela signifie que si on est capable de connaitre toutes les fréquences présentes dans le signal donc on est incapable de dire à quel moment elle se produit dans le signal.

Pour cela on est obligé de passer à l'analyse temps-fréquence.

Les figures suivantes présentent la décomposition en ondelette de signal récupéré dans le palier 1Ha, avant intervention où les niveaux vibratoires étaient élevés de la pompe WE, la date 02/09/2015.

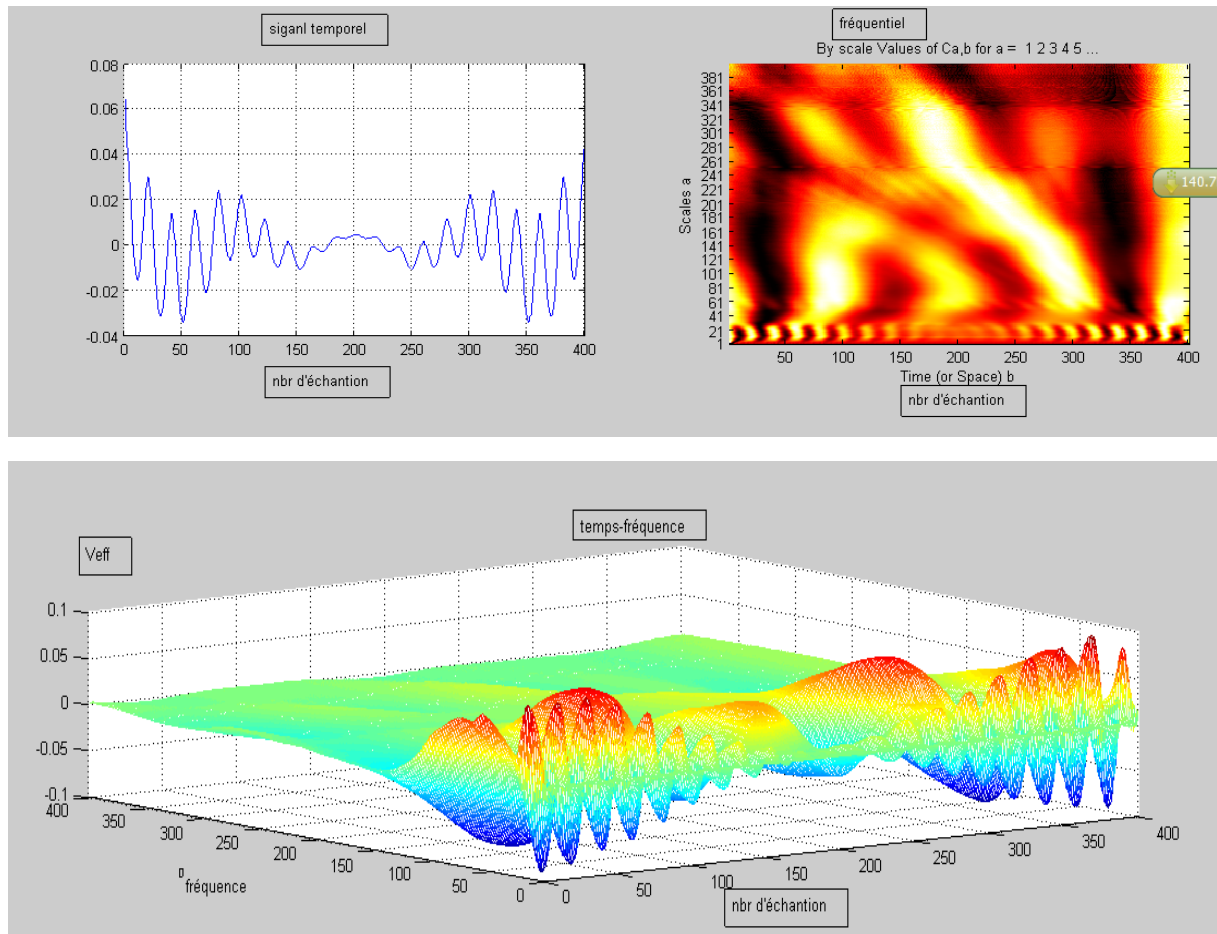


Figure 2.8 : transformé par ondelette de signal de la pompe WE avant intervention.

Le passage de l'analyse fréquentielle vers l'analyse temps-fréquence nous permet de voir des informations à la fois sur la fréquence et le temps.

On remarque bien l'évolution des pics à la fréquence 7.5 Hz dans le temps est presque la même on peut dire que les effets de cette fréquence sur les vibrations de la machines sont permanents, mais d'une façon alternative ou bien sinusoïdale et avec des amplitudes égaux, pour les autres il y a des zones d'apparition avec des niveaux d'amplitudes différents, pour la zone des hautes fréquences on constate que les niveaux vibratoires sont presque nuls.

3.2. Après intervention : les mesures sont prêtes après l'intervention de l'équipe maintenance sur la pompe WE.

3.2.1. Analyse spectrale : pour vérifier que les niveaux des vibrations sont diminués après intervention sur la pompe, on effectue cette analyse.

Cette figure représente le signal temporel et son spectre fait dans MATLAB, récupéré dans le palier 1Ha après révision de la pompe où les niveaux vibratoires sont diminués.

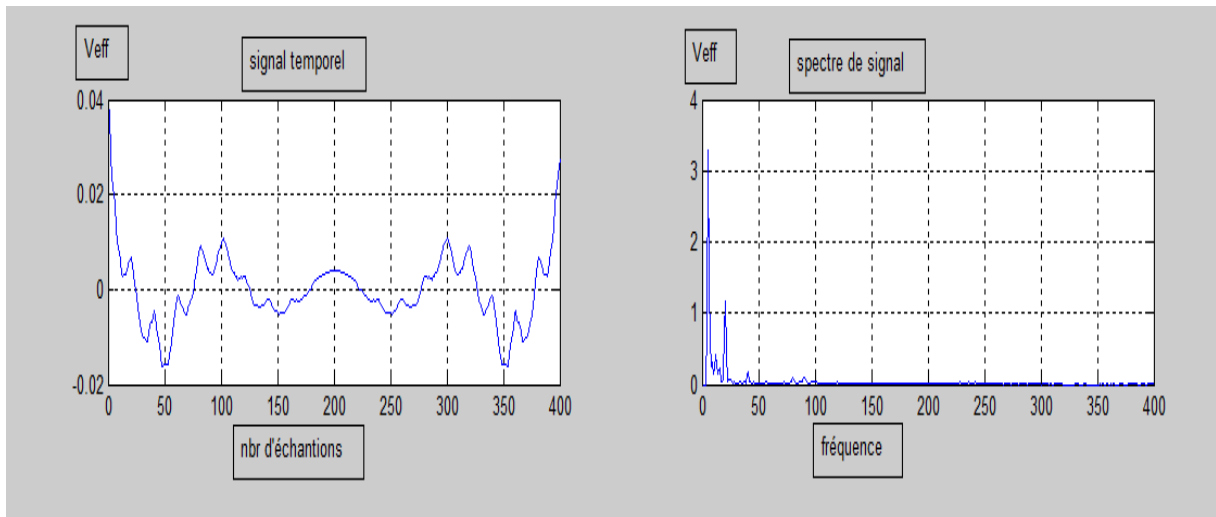


Figure 2.9 : signal temporel et son spectre après intervention de la pompe WE

Toutes les interprétations en détail sont présentées dans le projet fin d'étude [34].

3.2.2. Analyse temps-fréquence :

Les figures suivantes montrent la décomposition en ondelette de signal récupéré dans le palier 1Ha après révision, la date 06/09/2015.

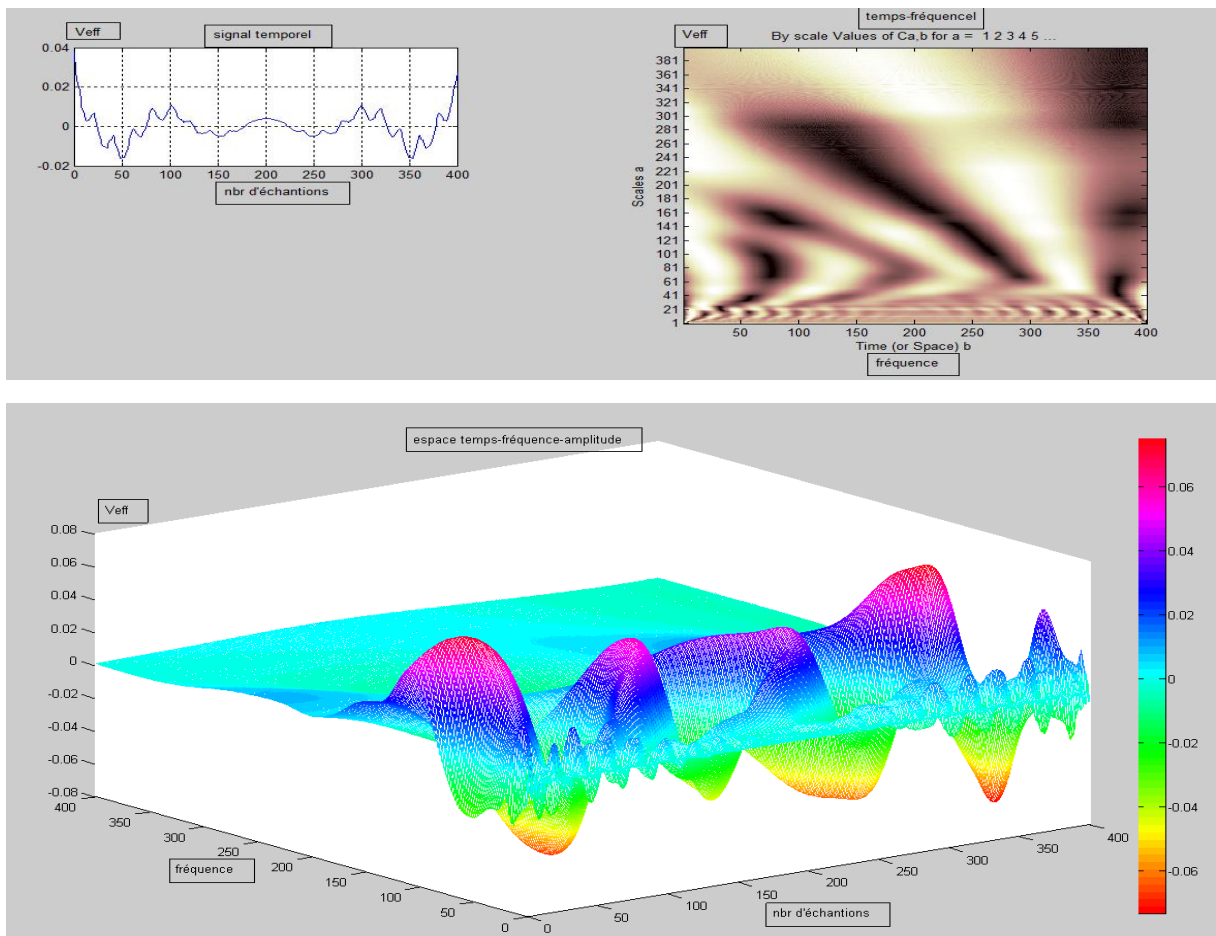


Figure 2.10 : décomposition de signal par ondelette après révision sur la pompe WE

On remarque que les pics à la fréquence de 7.5Hz sont toujours présents et leur évolution permanente toujours présente mais avec des amplitudes plus faibles par rapport à la première mesure, on remarque aussi que les pics à 25Hz sont très faibles avec presque la même distribution dans le temps, pour les zones hautes fréquences, on voit la même distribution dans le temps avec des faibles amplitudes.

Cette analyse avancée de traitement de signal par des méthodes temps-fréquence, la décomposition en ondelette, nous a donné les mêmes résultats trouvées dans notre projet fin d'étude [34], et cela du essentiellement de la nature de signal, ce dernier est presque stationnaire donc il n'y aura pas de différence entre l'analyse spectrale et l'analyse temps-fréquence et cela du à l'effet stationnaire de résonance des forces extérieurs et la pompe d'un part, et de phénomène de balourd du aux infiltrations de sable et déséquilibre massique du rotor.

4. Conclusion :

Les grandeurs scalaires ressortissant de mesures globales (la valeur efficace et le Kurtosis) permettent une première appréciation de l'état vibratoire d'une installation. Ces indicateurs sont d'ailleurs habituellement prescrits par les normes internationales. Malheureusement, pour un diagnostic approfondi identifiant de façon précise les organes défailants et surtout les défauts naissants, ils sont limités.

Les premiers diagnostics avancés des défauts sur les machines tournantes sont basés sur les signaux temporels, en particulier les analyses par spectre, cepstre ainsi que les techniques de modulation. La plupart de ces méthodes donnent des résultats acceptables quand il s'agit de déceler l'existence d'anomalies courantes dans l'installation. Cependant, peu d'information est donnée sur la localisation tant dans l'espace que dans le temps de ces défauts. De cette lacune ont été créées les techniques d'analyse du signal dans le domaine temps-fréquence, où beaucoup plus d'informations aidant au diagnostic apparaissent. Parmi ces méthodes, il convient de citer notamment le spectrogramme, la distribution de Wigner-Ville et la décomposition en ondelettes.

Cette dernière a montré de nombreux avantages dans le cadre de la maintenance préventive conditionnelle des machines tournantes.

Conclusion générale

A l'issue de ce travail, une étude bibliographique approfondie a été présentée montrant divers problèmes liés à l'industrie, et le processus de l'identification des causes de défaillance, basé sur l'analyse vibratoire.

Le diagnostic des machines tournantes est basé sur le traitement des signaux récupérés par plusieurs méthodes, temporelles, fréquentielles et en temps-fréquence.

Les méthodes temporelles sont limitées et ne donne pas d'informations précise sur l'état de la machine, la méthode est basé sur le calcul des paramètres statistiques scalaires.

Par contre les méthodes fréquentielles sont faites pour diagnostiquer la machine dans le domaine des fréquences, mais le seul inconvénient est le manque d'information sur le temps de ces événements, cette méthode est appliquer fortement pour les signaux stationnaires.

Dans l'industrie on trouve généralement des signaux non-stationnaire, par conséquent on ne peut pas les traiter par les méthodes ordinaire par la FFT, on est obligé de faire l'analyse temps-fréquence pour effectuer un diagnostic approfondi.

Le traitement de signal par la décomposition en ondelette a été faite, les résultats trouvées par l'analyse temps-fréquence sont les mêmes trouvées par l'analyse spectrale, cela est du essentiellement à la nature des signaux et les phénomènes excitatrices sur la pompe.

Bibliographie

- [1]: Nelson Baxter, ABM Technical Services, Mooresville, Indiana, 'forty-eight case histories of intriguing machinery problem'
- [2] J.B. Allen L.R. Rabiner, "A Unified Approach to Short Time Fourier Analysis and Synthesis", Proc. of the IEEE, Vol.65, No.11, November 1977
- [3] R.A. Altes, "Detection Estimation and Classification with Spectrograms", J. Acoust. Soc. Am., Vol.67, No.4, pp.1232-1246, 1980
- [4] Cohen, L. Time-frequency distribution - a review. Proceedings of the IEEE 77, 1989, pp. 941-981
- [5] W.J. Wang & P.D.McFadden. Early detection of gear failure by vibration analysis I. Calculation of the time-frequency distribution. Mechanical Systems and Signal Processing. 1993, 7, pp. 193-203.
- [6]: Staszewski, W.J et Tomlinson, G.R. Local tooth fault detection in gearboxes using a moving window procedure. Mechanical Systems and Signal Processing. 1997, 11, pp. 331 350.
- [7] : Léonard, François. Phase spectrogram and frequency spectrogram as a new diagnostic tools. Mechanical Systems and Signal Processing. 2007, 21, pp. 125-137.
- [8]: Gu, S., Ni, J. and Yuan, J. Non-stationary signal analysis and transient machining process condition monitoring. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2002, 42, pp. 41-51.
- [9]: Meng, Q. et Qu, L. Rotating machinery fault diagnosis using Wigner distribution. Mechanical Systems and Signal Processing. 1991, 5, pp. 155-166.
- [10]: Pan, M.-C., et al. Fault diagnosis of joint backlash. Journal of Vibration and Acoustics. 1998, 120, pp. 13-24.
- [11]: Koo, I.S. et Kim, W.W. The development of reactor coolant pump vibration monitoring and a diagnostic system in the nuclear power plan. ISA Transactions. 2000, 39, pp. 309-316.
- [12]: Geng, Zunmin, Chen, Jin et Hull, Barry J. Analysis of engine vibration and design of an applicable diagnosing approach. International Journal of Mechanical Sciences. 2003, 45, pp. 1391- 1410.
- [13]: Baydar, N. et Ball, A. A comparative study of acoustic signals in detection of gear failures using Wigner-Ville distribution. Mechanical Systems and Signal Processing. 2001, 15, pp. 1091-1107.
- [14] : Buresti, Guido, Lombardi, Giovanni et Bellazzini, Jacopo. On the analysis of fluctuating velocity signals through methods based on the wavelet and Hilbert transforms. Chaos, Solitons and Fractals. 2004, 20, pp. 149-158.
- [15]: Addison, P.S., Watson, J.N. and Feng, T. Low oscillation complex wavelets. Journal of Sound and Vibration 2002, 254, pp. 733-762
- [16]: Wang, W.J. et Mc Fadden, P.D. Application of wavelets to gearbox vibration signals for fault detection. Journal of Sound and Vibration. 1996, 192, pp. 927-939.

- [17]: Luo, G.Y., Osypix, D. et Irle, M. On-line vibration analysis with fast continuous wavelet algorithm for condition monitoring of bearing. *Journal of Vibration and Control*. 2003, 9, pp. 931-947.
- [18]: Wang, C. et Gao, R.X. Wavelet transform with spectral postprocessing for enhanced feature extraction. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2003, 52, pp. 1296-1301.
- [19]: Boulahbal, D., Golnarghi, F. and Ismail, F. Amplitude and phase wavelet maps for the detection of cracks in geared system. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 1999, 13, pp. 423-436
- [20]: Meltzier, G. et Dien, N.P. Fault diagnosis in gears operating under non-stationary rotational speed using polar wavelet amplitude maps. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2004, 18, pp. 985-992.
- [21]: Rubini, R. et Meneghetti, U. Application of the envelope and wavelet transform analysis for the diagnosis of incipient faults in ball bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2001, 15, pp. 287-302.
- [22]: Aretakis, N. and Mathioudakis, K. Wavelet analysis for gas turbine fault diagnostics. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1997, 119, pp. 870-876.
- [23]: Dalpiaz, G. et Rivola, A. Condition monitoring and diagnostics in automatic machines: comparison of vibration analysis techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 1997, 11, pp. 53-73
- [24]: Lin, J., Zuo, M.J. et Fyfe, K.R. Mechanical fault detection based on the wavelet denoising technique. *Journal of Vibration and Acoustics*. 2004, 126, pp. 9-16.
- [25]: N. Baydar and A. Ball. Detection of gear failure via vibration and acoustic signals using wavelet transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2003, 17, pp. 787-804
- [26]: Torrence, Christopher et Compo, Gilbert P. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1999, Vol. 79, 1, pp. 61-78.
- [27] : Yin-ge, Xu et Yu-ling, Yan. Research on Haar spectrum in fault diagnosis of rotating machinery. *Applied Mathematics and Mechanics*. 1991, 12, pp. 61-66.
- [28]: Tonshoff, H.K., Li, X. et Lapp, C. Application of fast Haar transform and concurrent learning to tool-breakage detection in milling. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2003, 8, pp. 414-417.
- [29] : Wu, Jian-Da et Liu, Chiu-Hong. Investigation of engine fault diagnosis using discrete wavelet transform and neural network. *Expert systems with applications*. 2008, 35, pp. 1200-1213.
- [30]: Wu, Fangji et Qu, Liangsheng. Diagnosis of subharmonic faults of large rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2008.
- [31]: Lu, Chung-Jen et Hsu, Yu-Tsun. Vibration analysis of an inhomogeneous string damage detection by wavelet transforms. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2002, 44, pp. 745-754.
- [32] : D'Amours, Guillaume. Détection précoce de la propagation de fissures dans les engrenages droits par analyse vibratoire. University de Laval, 2000.

[33]: Staszewski, W. J. Identification of damping in MDOF systems using time-scale decomposition. *Journal of Sound and Vibration*. 1997, Vol. 2, 203, pp. 283-305.

[34]: A. Meherhera et A. Houari, 'étude de la rupture de l'arbre d'une machine tournante de la centrale thermique CAP-DJINET par analyse vibratoire', mémoire de fin d'étude, ENP Alger, 2016.