

Utilisation du Kurtosis dans le diagnostic des défauts combinés d'engrenages par la transformée continue en ondelettes

Kamel Belaid¹, Abdelhamid Miloudi², Mohand Slimani³

¹ Département de Génie Mécanique,
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.

² Laboratoire de Mécanique Avancée,
USTHB, Alger, Algérie.

³ Laboratoire de Mécanique, Structures et Energétique,
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.

Accepté le 28/07/2010

ملخص

يحتوي ه ذا العمل على الكشف عن عيبين مجتمعين من نوع الصدمة مثل على منظومة دواليب عن طريق التحويل المستمر للموجات. الفكرة هي عبارة عن حساب المعاملات بخطوات جداول دقيقة للغاية (0,1) التي سيكون لها كثير التكرار، ثم يتم حساب التفرطح (كيرطوزيس) لجميع ناقلات المقاييس، وإعطاء تركيز الطاقة حول كل تردد صدى أثير من قبل العيوب، وهذا التركيز من الطاقة في يمثل بتكرار المحدثات على الرسم البياني للتفرطح، وتحليل العوامل التي هي في كل حدة يتيح العودة إلى العيوب التي كانت السبب في ذلك.

الكلمات المفتاحية: التحويل المستمر للموجات؛ عيوب مجتمعة؛ عيوب الدواليب؛ التفرطح؛ التشخيص.

Résumé

Ce travail consiste à détecter deux défauts combinés de type choc, simulés sur un engrenage par la transformée continue en ondelettes. L'idée est de calculer les coefficients avec un pas très fin (0,1) de discrétisation des échelles ce qui permettra d'avoir une redondance importante, ensuite le Kurtosis est calculé pour tous les vecteurs des échelles, ce qui donne une concentration d'énergie autour de chaque fréquence de résonance excitée par les défauts. Cette concentration d'énergie se traduit par des bosses de redondance sur le graphe du Kurtosis. Enfin, l'analyse des coefficients associés à chaque bosse permet de remonter aux défauts qui les ont excités.

Mots-clefs : transformée continue en ondelettes ; défauts combinés ; défauts d'engrenages ; kurtosis ; diagnostic.

Abstract

This work consists in detecting two combined defects, simulated on gears using continuous wavelet transform. The idea is to calculate the wavelets coefficients with a very fine discretization of scales (0.1) which makes it possible to have an important redundancy, then Kurtosis is calculated for all vectors scales, giving an energy concentration around each resonance frequency excited by the defects. This energy concentration results in redundancies bumps on the graph of Kurtosis. Finally, the analysis of coefficients associated to each bump allows identifying the defects which have excited them.

Keywords: continuous wavelet transform; combined shock defects; gears defects; kurtosis; diagnosis.

Auteur correspondant: amiloudi@usthb.dz (Abdelhamid Miloudi)

© Université Badji Mokhtar - Annaba (Algérie).

1. INTRODUCTION

Réaliser un diagnostic adéquat sur l'état de santé d'une machine, revient à détecter tous les défauts qui l'ont affecté au cours de son fonctionnement. Or, il existe des situations pour lesquelles il est vraiment difficile d'obtenir un tel résultat.

Parmi ces situations, la présence de deux défauts de type choc affectant un ou deux organes d'une machine. Cette difficulté peut s'expliquer déjà, par la rareté des travaux, ou même des méthodes, qui traitent ce genre de situation. Dans un article précédent, il est proposé une méthode de diagnostic de deux défauts combinés par les ondelettes, à savoir : un défaut de balourd (stationnaire) sur un arbre supportant un pignon qui a une dent défectueuse (instationnaire) [1]. Ces 2 défauts présentent la même image vibratoire, mais ne sont pas de la même nature ; ce qui permet de séparer leurs composantes sans difficulté.

Les méthodes les plus utilisées pour détecter les défauts de type choc sont l'analyse spectrale, l'analyse cepstrale, la démodulation ou bien l'analyse des résonances repérées dans le spectre. En pratique, ce n'est pas toujours aussi facile d'obtenir un bon résultat avec ces dernières, vu les inconvénients de chacune de ces méthodes, surtout en présence de plusieurs défauts.

Un défaut de type choc génère une onde de choc dont l'étendue temporelle tend vers zéro, donc son spectre coiffe toutes les fréquences, ce qui permet l'excitation des résonances des structures ou d'organes composants la machine [2]. Beaucoup de travaux ont utilisé la méthode HFRT (High Frequency Resonance Technique) qui consiste à étudier justement ces résonances pour détecter les défauts qu'elles ont excités [3,4].

Nikolaou et Antoniadis ont utilisé 2 méthodes pour déterminer les coefficients d'ondelettes relatifs à la fréquence de

résonance, la première consiste à prélever l'amplitude maximale dans chaque colonne de la matrice des coefficients ; alors que la seconde propose un seuil qui filtre les coefficients en ne laissant que ceux qui représentent la résonance [5].

Dans ce travail, le Kurtosis est utilisé pour retrouver l'échelle dont les coefficients représentent la meilleure résonance excitée. Le Kurtosis est un indicateur scalaire sollicité dans le domaine temporel pour la détection des défauts qui génèrent des signaux impulsifs. Il est très sensible à l'apparition de chocs dans un signal généré par une machine. L'arrivée de la transformée en ondelettes, qui est une méthode très puissante dans le diagnostic, a permis de confirmer, une autre fois, l'intérêt de cet indicateur utilisé dans plusieurs travaux de recherche qui ont attiré à la détection de défauts de types chocs.

Lin et Zuo ont appliqué le Kurtosis pour la recherche du meilleur profil de l'ondelette de Morlet afin de rapprocher la forme d'un signal instationnaire ; il est calculé pour plusieurs combinaisons de l'échelle « a » et du paramètre « ξ » qui contrôle la forme de l'ondelette mère [6]. Aussi, après la décomposition des détails et approximations d'un signal, le Kurtosis peut être appliqué à ces derniers et sa valeur la plus importante concerne le détail qui représente le signal relatif au choc [7]. Le Kurtosis est aussi utilisé, dans le cas de la Transformée Continue en Ondelettes (CWT) comme un indicateur pour reconnaître l'échelle dont les coefficients contiennent l'information relative au signal du type choc : c'est la valeur la plus élevée [8]. En effet, puisque le pas est de 1, ceci permet seulement de détecter le défaut le plus important en amplitude, c'est-à-dire le plus grave ou bien celui qui a excité une résonance bien amortie.

La transformée continue en ondelettes (CWT) est redondante, c'est-à-dire que l'information qui se trouve dans un

vecteur d'échelle peut se retrouver dans d'autres, autrement dit, si une information sur une composante donnée se trouve dans un vecteur d'échelle, alors elle sera présente dans les vecteurs avoisinants, de part et d'autre de l'échelle caractéristique.

La démarche consiste donc à calculer les coefficients d'ondelettes avec un pas de discrétisation d'échelle de 0,1 ; ce qui donne une redondance importante permettant de localiser la concentration d'énergie autour des fréquences des résonances présentes dans le signal. Pour localiser ces fréquences, le Kurtosis est appliqué aux coefficients selon les échelles et ainsi, des bosses de redondances se constitueront autour de chaque fréquence, par la suite, si ces résonances sont bien amorties, l'analyse permettra de remonter aux défauts qui les ont excités.

2. ETUDE THEORIQUE ET SIMULATION

La transformée de Fourier et ses dérivées permettent de localiser l'information soit dans le domaine fréquentiel, soit dans le domaine temporel, mais pas simultanément. La nécessité d'avoir ces deux informations sur le même graphe a poussé Gabor à proposer une représentation temps/fréquence, qui a pris le nom de la transformée de Fourier à court terme (TFCT) et qui consiste à faire translater une fenêtre, de largeur fixée au préalable, d'un bout à l'autre du signal [9].

La constance de la taille de la fenêtre dans la TFCT engendre 2 inconvénients qui limitent considérablement son efficacité, il s'agit de la faible résolution conjointe temps/fréquence et de l'impossibilité d'étudier 2 phénomènes de différentes échelles pendant l'analyse. Ces problèmes trouvent la solution dans la variation de la taille de la fenêtre au cours de l'analyse, permettant la transformée en ondelettes proposée par Morlet [10]. Ceci consiste à dilater ou comprimer la

fonction d'analyse $\Psi(t)$ (Ondelette de référence) par un facteur d'échelle « a », et la translation de la fonction $\Psi(t)$ sur le signal est assurée par un facteur de décalage « b » tel que représenté (éq. 1) :

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

avec $\frac{1}{\sqrt{a}}$ un coefficient utilisé pour avoir la même énergie dans chacune des ondelettes analysantes. La notion de fréquence est remplacée par la notion d'échelle et celles-ci sont inversement proportionnelles.

La transformée en ondelettes (TO) s'interprète comme un filtrage adapté multi-échelle ayant pour objectif la recherche des instants où le signal ressemble le plus à une forme connue à priori et cela pour différentes versions dilatées de cette forme. Ainsi, elle adapte la taille de la fenêtre d'analyse aux caractéristiques locales du signal : petite fenêtre lorsque le signal varie rapidement et plus grande fenêtre lorsque ses variations sont lentes [11]. La résolution temporelle est plus importante pour les hautes fréquences que pour les basses et inversement, la résolution fréquentielle est plus importante pour les basses fréquences que pour les hautes.

La version continue de cette méthode (CWT) consiste à trouver une grandeur $C_w(a,b)$ qui quantifie la ressemblance du signal à analyser $s(t)$ avec l'ondelette $\psi_{a,b}(t)$ en faisant varier les paramètres a et b dans un domaine continu (ils peuvent prendre des valeurs de l'ensemble des réels R) [10,12].

Cette grandeur est le produit scalaire du signal $s(t)$ et de l'ondelette $\psi_{a,b}(t)$:

$$C_w(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt \quad (2)$$

avec $\overline{\psi_{a,b}(t)}$ est le conjugué de $\psi_{a,b}(t)$ et $s(t)$ le signal mesuré.

Ce coefficient renseigne sur la similitude qui existe entre le signal et l'ondelette, autrement dit, l'importance de la fréquence $1/a$ autour du point b (ou à l'instant b) pour le signal. Les coefficients $C_w(a,b)$ affectés à chaque fonction élémentaire $\psi_{a,b}(t)$ pour décomposer un signal quelconque, transmettent une information directe sur les propriétés temporelles et fréquentielles du signal. Elles permettent en conséquence de repérer avec précision l'apparition d'une fréquence donnée à un instant donné dans un signal.

Bien que la transformée continue en ondelettes mène vers une représentation temps-échelle, mais c'est le concept de fréquence qui est le plus explicite et le plus utilisé dans la caractérisation des phénomènes physiques. C'est pour cela qu'il est indispensable de lier ces 2 concepts. L'équation (3) permet de passer d'un domaine à l'autre [13] :

$$a = \frac{f_{co}}{f} f_e = \frac{f_{co}}{f \Delta t} \tag{3}$$

f_{co} : fréquence centrale
 f_e : fréquence d'échantillonnage
 $1/\Delta t, \Delta t$: résolution temporelle ;

Dans ce travail, c'est l'ondelette de Morlet qui est utilisée pour l'analyse des signaux, son équation mathématique est définie par une sinusoïde modulée par une

exponentielle, et pour des valeurs d'échelles faibles, la forme des ondelettes engendrées avoisine celle d'un choc [14].

Le Kurtosis, qui est utilisé pour la recherche des résonances, est donné par suivante :

$$K_{urt} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s(i) - \bar{s})^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s(i) - \bar{s})^2 \right]^2} \quad (\bar{s} \text{ la moyenne}) \tag{4}$$

K_{urt} : Kurtosis ;
 N : nombre d'échantillons.

Etant donné un signal comportant 2 composantes instationnaires générées par l'équation (5) dont les caractéristiques sont données dans le tableau 1 [15], le signal résultat est la somme des deux signaux instationnaires (Fig. 2) et du bruit :

$$s(t) = Ae^{-t/\tau} \sin 2\pi f_L t * \sum_{k=0}^{\infty} \delta(t - kT_d) \tag{5}$$

τ : temps de relaxation,
 f_L : fréquence d'oscillations
 $(f_L = f_0 \sqrt{1 - 1/Q^2})$,

Q : facteur d'amplification,
 f_0 : fréquence de résonance),
 T_d : période de répétition des chocs ($1/f_d$).

Tableau 1. Caractéristiques du signal simulé

	Fréquence de défaut f_d	Nombre de chocs k	Fréquence de résonance f_0	Echelle correspondante	Temps de relaxation τ	Amplitude A
Signal 1	5 Hz	4	800 Hz	5	0.004 s	2
Signal 2	17.5 Hz	14	1500 Hz	3	0.004 s	2

Un signal de type choc est composé de 2 fréquences ; l'une relative au défaut et l'autre concerne la résonance excitée (éq. 5). L'étude de cette résonance permet de remonter à la fréquence du défaut [16], mais en pratique, cette dernière n'est pas connue au préalable. Les échelles données dans le Tableau 1, qui sont déterminées

par l'équation 3, concernent donc, les fréquences de résonances (en remplaçant f par la fréquence de résonance).

La figure 3 donne le spectre du signal simulé, où est repérée la fréquence 1500 Hz, mais la fréquence à 800 Hz

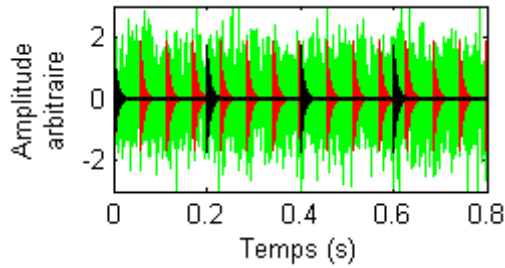


Figure 1. Les trois composantes du signal

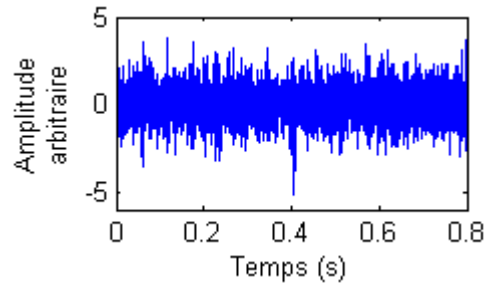


Figure 2. Le signal simulé (SNR=1)

pas du bruit qui a une amplitude importante. Ceci peut s'expliquer par le nombre de choc composant chaque signal. Plus le nombre de choc est petit (Tab. 1), son spectre ou le spectre d'enveloppe présente des amplitudes faibles aux fréquences caractéristiques. Le calcul des coefficients de la CWT est limité à l'échelle 20 pour privilégier les hautes fréquences dans lesquelles se trouvent celles des résonances.

Le Kurtosis des coefficients d'ondelettes, avec un pas de discrétisation

des échelles de 1, est donné dans la figure 4. Sa plus grande valeur est située au niveau de l'échelle 5, correspondant à la fréquence de résonance 800 Hz (Figs. 5, 6 et 7). Pour le deuxième défaut, la valeur de Kurtosis à l'échelle 3 n'émerge pas au delà des autres d'une manière significative. Donc, un pas de 1 est trop grand pour pouvoir détecter 2 phénomènes de même nature.

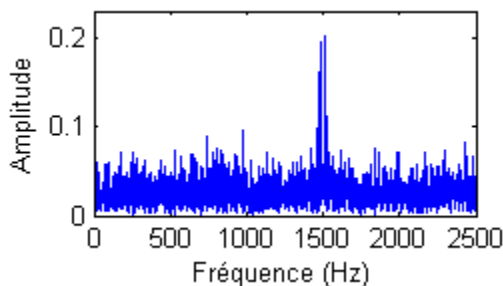


Figure 3. Le spectre du signal simulé

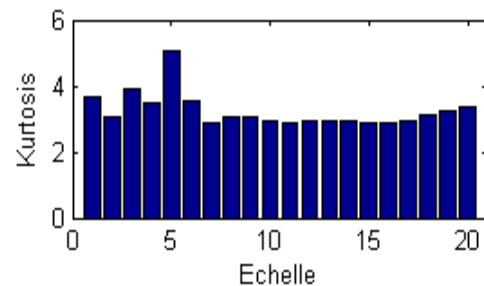


Figure 4. Le Kurtosis des coefficients (pas=1)

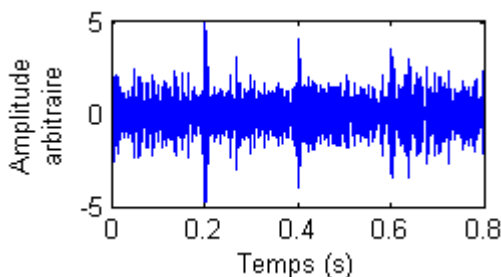


Figure 5. Les coefficients d'ondelettes à l'échelle 5

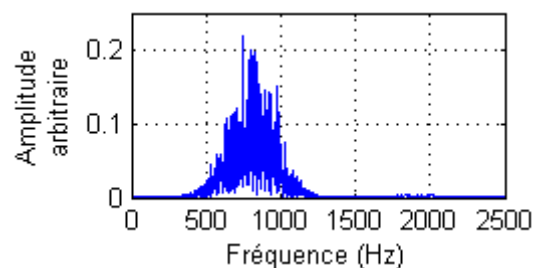


Figure 6. Le spectre des coefficients d'ondelettes à l'échelle 5

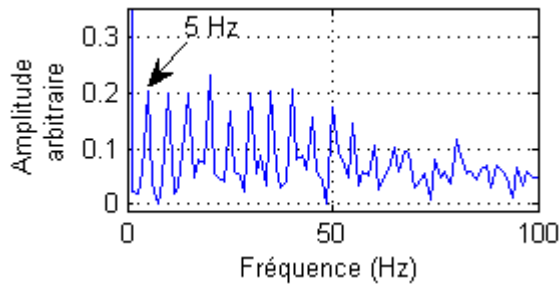


Figure 7. Le spectre d'enveloppe des coefficients à l'échelle 5

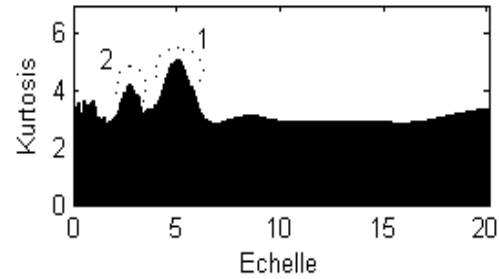


Figure 8. Le Kurtosis des coefficients (pas=0.1)

La figure 8 montre le Kurtosis des coefficients avec un pas de discrétisation des échelles de 0,1. Dans ce cas, évidemment plus d'informations sont observées, ce qui permet des concentrations d'énergie autour de chaque

fréquence de résonance, caractérisées par des bosses. L'étude des coefficients de la deuxième bosse (Fig. 8) permet de détecter le défaut à 17,5 Hz (Figs. 9, 10 et 11).

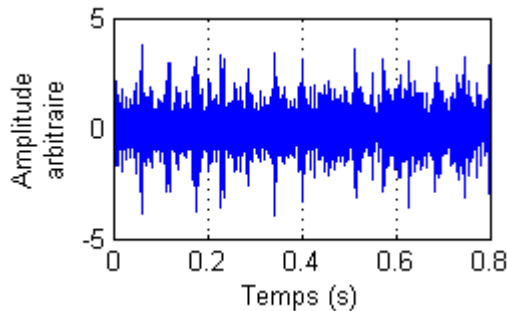


Figure 9. Les coefficients d'ondelettes à l'échelle 2,7

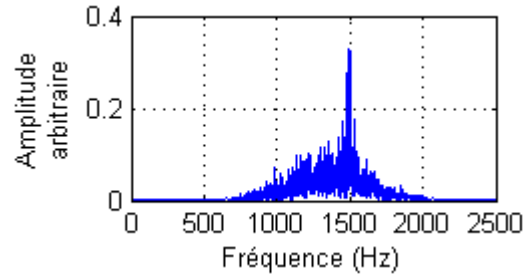


Figure 10. Le spectre des coefficients d'ondelettes à l'échelle 2,7

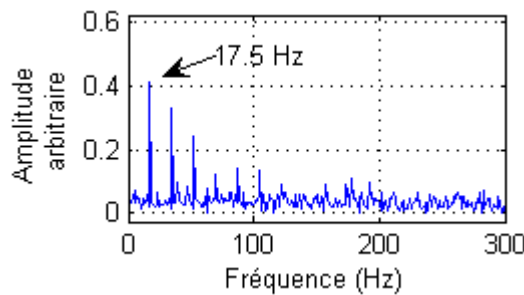


Figure 11. Le spectre d'enveloppe des coefficients à l'échelle 2,7

Il est constaté que la plus grande valeur du Kurtosis au niveau de la bosse 2 (Fig. 8) se trouve à l'échelle 2,7, et c'est exactement la valeur obtenue par l'équation 3 en ce qui concerne l'échelle de la fréquence 1500 Hz. L'amplitude à cette valeur est légèrement supérieure à

celle de la figure 4 au niveau de l'échelle 3.

3. EXPERIMENTATION

Sur un réducteur à dentures droites, un défaut sur une dent de chaque pignon est simulé. Les défauts ont la forme de

rayures sur le flanc de la dent, tout au long de sa largeur. Le défaut sur le pignon d'entrée est important par rapport à celui de sortie. Le premier défaut à détecter est celui du pignon d'entrée caractérisé par un peigne de raies à la fréquence de rotation de l'arbre A₁, et le second est la rencontre des 2 défauts, caractérisé par un peigne de raies à la fréquence de coïncidence (f_c) déterminée par l'équation suivante :

$$f_c = \frac{z_1 f_1}{PPCM(z_1, z_2)} = \frac{z_2 f_2}{PPCM(z_1, z_2)} \quad (6)$$

avec :

z_i : nombre de dents de chaque pignon (i=1, 2),

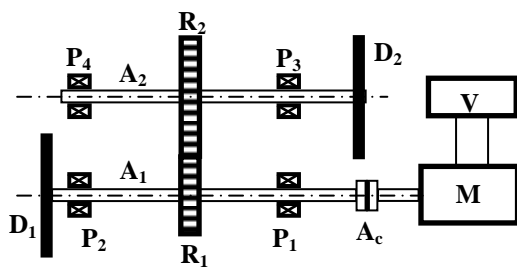


Figure 12a. Schéma du banc d'essai



Figure 12b. Photo du banc d'essai

Tableau 2. Caractéristiques du banc d'essai

N°	Désignation	Caractéristiques
1	Moteur électrique M	P = 1.5 kW
2	Variateur de fréquence V	0 < f < 50 Hz
3	Arbre moteur A ₁	
4	Arbre récepteur A ₂	
5	Disques d'inertie (02) identiques D _i	Percés
6	Roue dentée R ₁	80 dents
7	Roue dentée R ₂	100 dents
8	Paliers (04) identiques P _i	1 rangée de bille
9	Accouplement Ac	Elastique

3.1 Etude de cas N° 1

Les signaux sont recueillis à une vitesse de rotation de 3000 tr/min (50 Hz)

PPCM(z₁, z₂) : le plus petit commun multiple de z₁ et z₂,

f_i : fréquence de rotation des arbres (i=1,2).

Le capteur utilisé est un accéléromètre de type piézoélectrique (placé sur le palier P1), avec une sensibilité de 9,82 mV/g et une réponse fréquentielle de 1 Hz à 4 kHz. Ce capteur, relié au boîtier modèle 4-2 voies, est connecté à l'analyseur de signal qui est piloté par un ordinateur utilisant un logiciel de traitement et d'analyse de signaux de type OROS 25.

La figure 12 montre le banc d'essai et le tableau 2 donne les caractéristiques techniques. Les signaux recueillis ont 4096 points (0,8 s) pour une fréquence d'échantillonnage de 5120 Hz.

dont la fréquence de coïncidence est égale à 10 Hz.

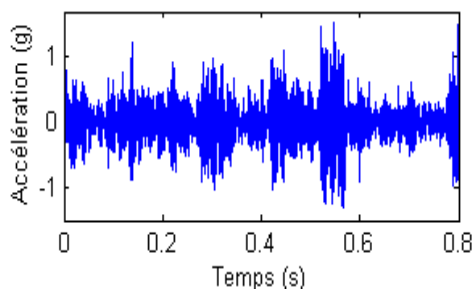


Figure 13. Signal à 3000 tr/min

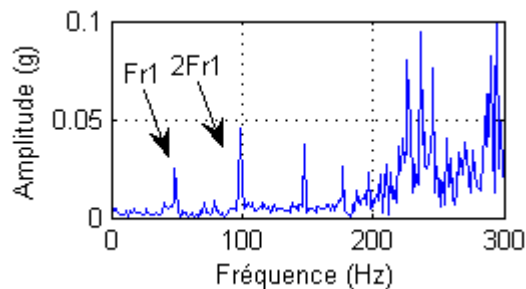


Figure 14. Basses fréquences

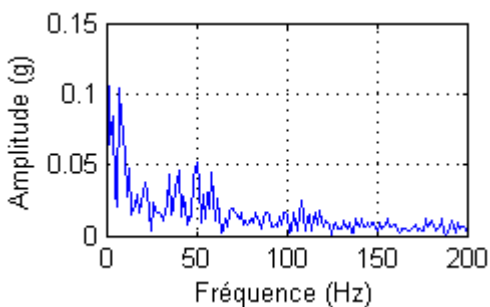


Figure 15. Enveloppe du signal à 3000 tr/min

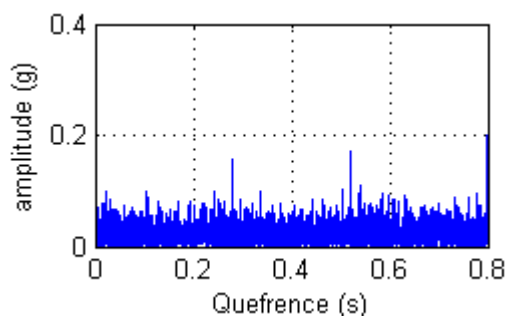


Figure 16. Cepstre du signal à 3000 tr/min

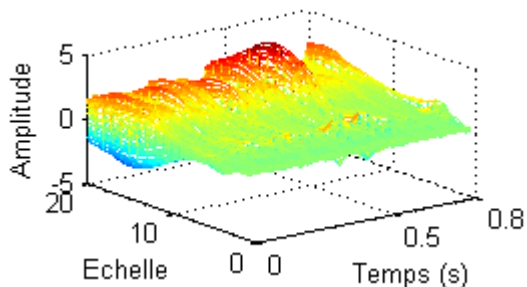


Figure 17. Coefficients d'ondelettes en 3D

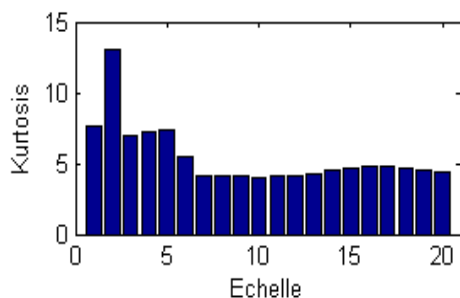


Figure 18. Kurtosis des coefficients de la CWT

La figure 14 montre les basses fréquences au niveau du spectre du signal, où il est constaté un peigne de raies à la fréquence 50 Hz relatif au défaut de la dent du pignon R1, mais cette situation ne permet pas d'être sûr que c'est un défaut de la dent, puisque c'est une image vibratoire commune à plusieurs défauts (même stationnaire). Donc il faut pousser le diagnostic avec le cepstre ou l'enveloppe.

Les figures 15 et 16 donnent respectivement l'enveloppe et le cepstre avec lequel il est difficile de statuer sur l'existence des défauts. La figure 17 montre les coefficients d'ondelettes en 3D, mais la distinction des échelles qui

concernent les fréquences de résonances s'avère aussi très difficile. Pour une plage des échelles allant de 1 à 20, les coefficients d'ondelettes sont calculés tout d'abord avec un pas de 1, leur Kurtosis est donné dans la figure 18 ; sa plus grande valeur se situe à l'échelle 2. Le spectre d'enveloppe des coefficients à cette échelle permet d'avoir une raie à la fréquence 50 Hz due au choc du défaut se trouvant sur le pignon d'entrée (Fig. 19). Dans ce cas, il n'est pas possible de prédire l'existence d'un autre défaut de même nature; autrement dit, c'est difficile de remarquer l'échelle de l'autre défaut vu la faible amplitude du Kurtosis au niveau des autres échelles.

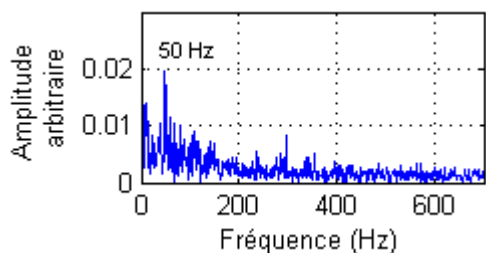


Figure 19. Spectre d'enveloppe des coefficients à l'échelle 2

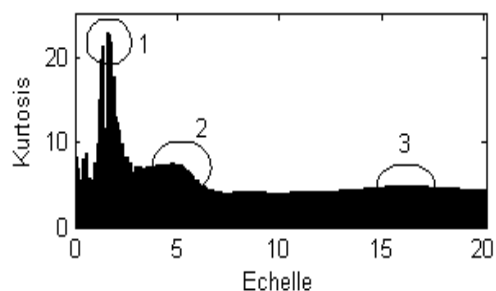


Figure 20. Kurtosis des coefficients (pas=0.1)

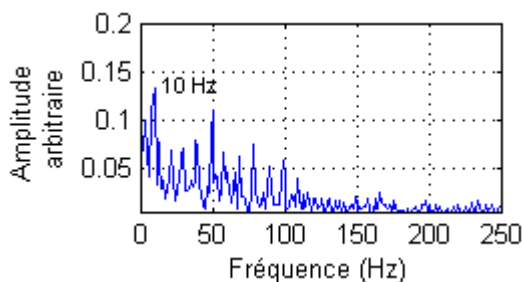


Figure 21. Spectre d'enveloppe des coefficients à l'échelle 4,7

Dans la figure 20, il est remarqué l'existence de 3 bosses (1, 2 et 3) situées respectivement entre les échelles 1,5-3,5; 4-6 et 15,5-16,5. La première concerne évidemment le défaut détecté déjà avec le pas 1, pour la deuxième et la troisième, il suffit de prélever les coefficients qui se trouvent à l'échelle qui a la plus grande amplitude afin de voir l'information qu'ils véhiculent.

Pour la deuxième, l'échelle exacte est 4,7; le spectre de ses coefficients (Fig. 21) montre clairement un peigne de raies dont la fréquence fondamentale est 10 Hz correspondant à la fréquence de coïncidence. Dans cette figure, il y a aussi l'émergence de la composante à 50 Hz, relative au défaut sur le pignon d'entrée; cela peut s'expliquer par le fait que les 2

défauts ont excité la même résonance ou peut être des résonances proches. Pour la troisième bosse, son spectre est peu lisible, ceci est dû, peut être, à la réponse de la résonance excitée qui n'a pas eu le temps de s'amortir.

3.2 Etude de cas N° 2

Pour un signal de 2700 tr/min (Fig. 22) avec $f_c=9\text{Hz}$, le Kurtosis de ses coefficients d'ondelettes (pas=0,1) est donné dans la figure 23. La plus grande valeur se situe à l'échelle 2 et le spectre d'enveloppe des coefficients à cette échelle montre une composante à 45 Hz avec son deuxième harmonique; ce qui met en évidence le défaut qui se trouve au niveau du pignon d'entrée (Fig. 24).

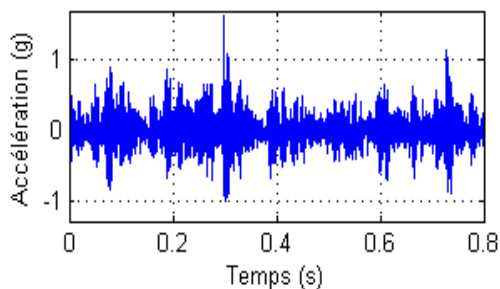


Figure 22. Signal à 2700 tr/min

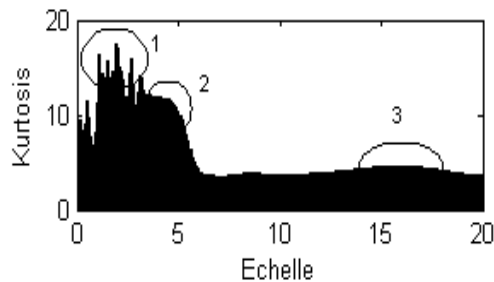


Figure 23. Kurtosis des coefficients (pas=0,1)

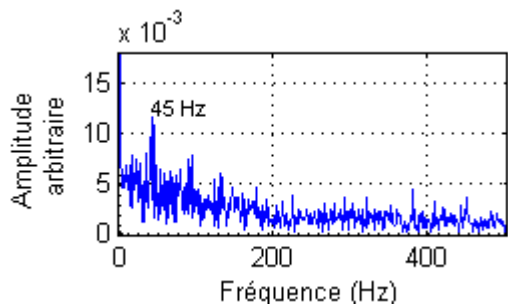


Figure 24. Spectre d'enveloppe des coefficients à l'échelle 1,9

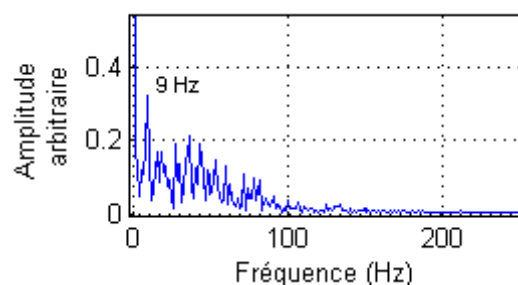


Figure 25. Spectre d'enveloppe des coefficients à l'échelle 16

Pour les coefficients qui se trouvent au niveau de la bosse 3, leur amplitude est faible devant celles des bosses 1 et 2. L'échelle au milieu est 16, le spectre d'enveloppe des coefficients à cette échelle est donné dans la figure 25 où la présence d'un peigne de raies dont la fréquence fondamentale est égale à 9 Hz

est constatée, mettant ainsi la présence d'un défaut sur chaque pignon. La figure 26 montre le spectre des coefficients qui se trouvent à l'échelle 4,9 ; c'est-à-dire au niveau de la bosse 2, avec la présence des images vibratoires des deux défauts. Ceci est dû au fait que ces derniers ont excité la même résonance.

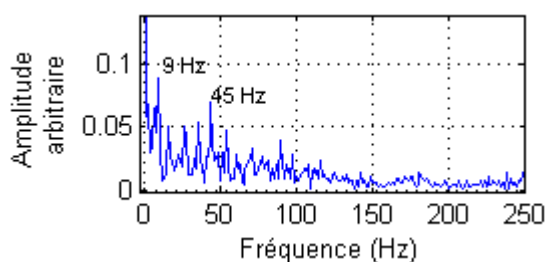


Figure 26. Spectre d'enveloppe des coefficients à l'échelle 4,9

3.3 Etude de cas N° 3

Dans ce troisième cas (Fig. 27), le but est de voir laquelle des fréquences de résonances qui donne une meilleure information sur le défaut, autrement dit, laquelle des bosses de redondances

faudrait-il choisir, évidemment en fonction de sa forme. Pour cela, un exemple dans lequel un défaut a excité trois résonances est choisi.

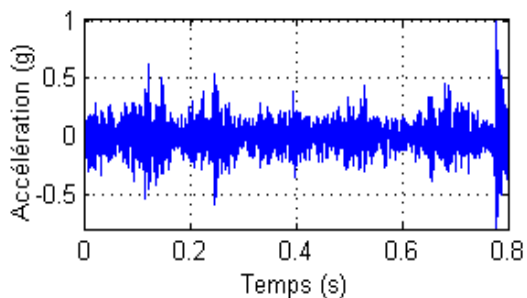


Figure 27. Signal à 2400 tr/min

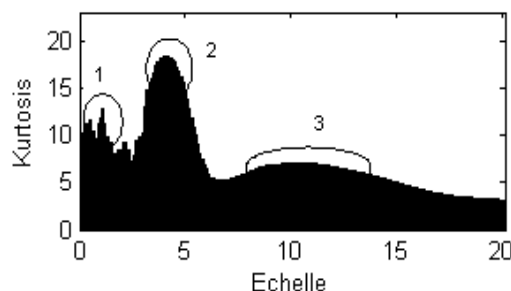


Figure 28. Kurtosis des coefficients (pas=0,1)

La figure 28 montre le Kurtosis d'un signal à 2400 tr/min ($f_c=8$) avec 3 bosses (1, 2 et 3) ; la première, sa forme n'est pas bien équilibrée par rapport aux deux autres, la deuxième est étroite mais de grande amplitude et la troisième est large mais de faible amplitude. Les figures 29, 30 et 31 donnent respectivement les spectres d'enveloppe des coefficients des bosses 1,2 et 3. Le spectre de la figure 29 donne un peigne de raies à la fréquence du défaut mais leur amplitude est très faible.

Par contre dans la figure 30, l'amplitude des raies est beaucoup plus supérieure que celle de la figure 29. La bosse 3, la plus large, donne un spectre avec une seule raie (8 Hz) de grande amplitude par rapport aux deux autres. De ce fait, les bosses 2 et 3 donnent un meilleur résultat puisque l'amplitude des raies de leur spectre est nettement supérieure, ce qui évite le risque de se noyer dans le bruit ou dans de composantes parasites.

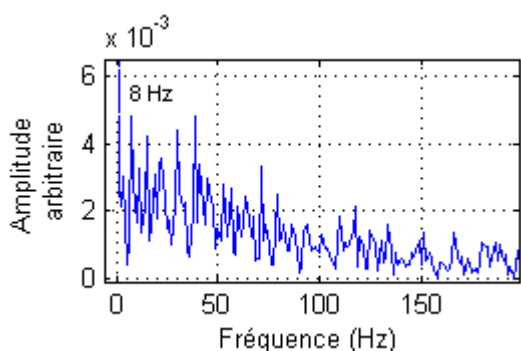


Figure 29. Spectre d'enveloppe des coefficients à l'échelle 1,1

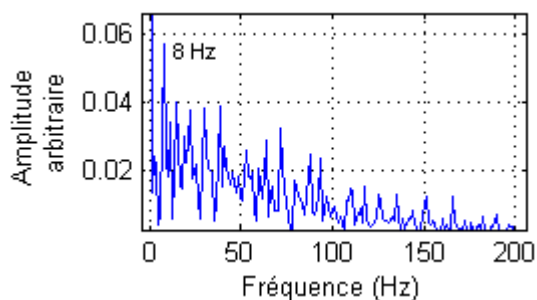


Figure 30. Spectre d'enveloppe des coefficients à l'échelle 4,1

Pour retrouver la fréquence de résonance excitée par le défaut, il suffit de calculer le spectre des coefficients au niveau des échelles correspondantes. Les figures 32, 33 et 34 montrent respectivement les spectres au niveau des

échelles 1,1 ; 4,1 et 10,5.

La figure 32 confirme la remarque faite sur la bosse 1 que la fréquence de résonance excitée n'est pas bien définie comme dans le cas des figures 33 et 34.

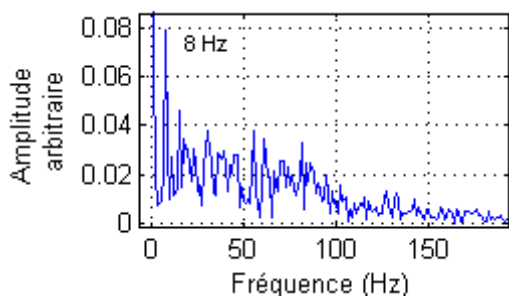


Figure 31. Spectre d'enveloppe des coefficients à l'échelle 10,5

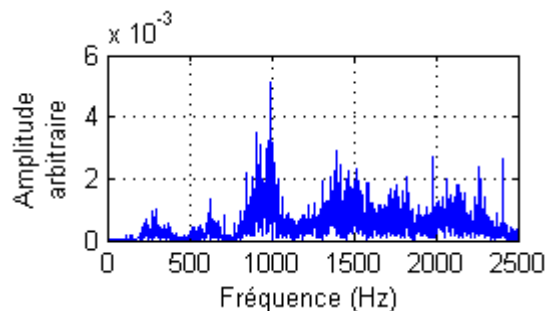


Figure 32. Spectre des coefficients à l'échelle 1,1

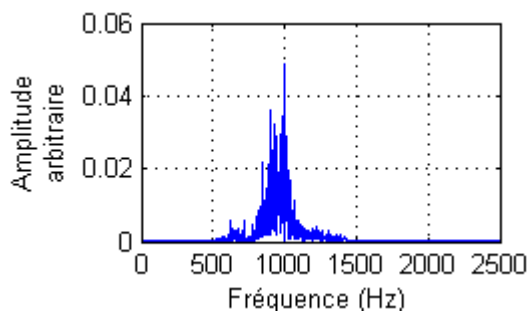


Figure 33. Spectre des coefficients à l'échelle 4,1

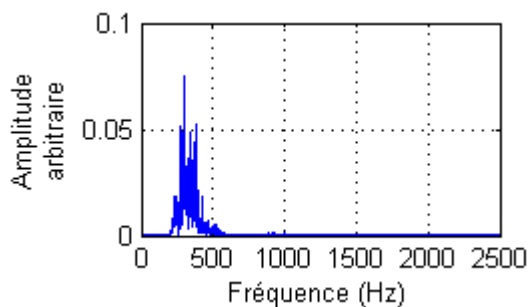


Figure 34. Spectre des coefficients à l'échelle 10,5

Ceci est justifié par le fait que la plage fréquentielle du signal est limitée à 2500 Hz, qui correspond à l'échelle 1,6. De ce fait, toutes les échelles inférieures à celle-ci (de 0,1 à 1,5), représentent des fréquences qui ne se trouvent pas dans le signal. Par exemple, la fréquence de l'échelle 1,1 est égale à 3781 Hz. Cependant, comme les ondelettes engendrées sont très voisines, ceci a permis d'obtenir un peigne de raies à la fréquence de défaut (Fig. 29), mais de faible amplitude puisque les fréquences de résonances qu'elles représentent, n'existent pas dans le signal.

4. CONCLUSIONS

Le diagnostic de défauts de type choc est une opération très délicate surtout dans le cas de la combinaison de deux ou de plusieurs défauts. Dans ce travail, le Kurtosis a été associé à la transformée continue en ondelettes pour pouvoir détecter deux défauts combinés d'engrenages.

Le faible pas de discrétisation permet d'analyser le signal avec un nombre important d'ondelettes d'allures très voisines ce qui va engendrer une redondance autour de l'échelle de la fréquence de résonance. Pour pouvoir détecter cette résonance et remonter au défaut qui l'a excité, le Kurtosis est calculé pour les vecteurs d'échelles, ce qui permet de repérer cette redondance.

Cette méthode présente deux avantages, le premier réside dans la simplicité de la recherche des fréquences des résonances qui sont facilement détectables par les redondances, le deuxième, c'est que même les fréquences de résonances les plus basses sont aussi détectées. Ceci évite de générer des signaux temporels avec une fréquence d'échantillonnage importante pour privilégier les hautes fréquences afin de les repérer. A partir de ce dernier point, il est intéressant d'appliquer cette approche pour des défauts de roulements qui excitent des résonances de très hautes fréquences.

Références

- [1] K. Belaid et A. Miloudi, *Utilisation de la transformée en ondelettes dans la détection des défauts combinés de Machines Tournantes*, 3^{ème} Congrès International Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques, 16-18 Mars 2009, Hammamet, Tunisie.
- [2] J. Morel, *Vibrations des Machines et Diagnostic de leur Etat Mécanique*, Eyrolles, 1992.
- [3] D. Ho et R.B. Randall, *Optimisation of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearing fault signals*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 14, Issue 5, 2000, p.763-788.
- [4] C. Pachaud, *Détection des défauts localisées par analyse des résonances hautes fréquences*, VII^e colloque international d'acoustique, vibrations, chocs, GAMI, Lyon, France, 1988.
- [5] N.G. Nikolaou et I.A. Antoniadis, *Demodulation of Vibration Signals Generated by Defects in Rolling Element Bearings using Complex Shifted Morlet Wavelet*, Mechanical Systems and Signal Processing, Elsevier Science, Vol. 16, Issue 4, 2002, p.677-694.
- [6] J. Lin et M.J. Zuo, *Gearbox fault diagnosis using adaptive wavelet filter*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 17, Issue 6, 2003, p.1259-1269.
- [7] A. Djebala, N. Ouelaa et N. Hamzaoui, *Detection of rolling bearing defects using discrete wavelet analysis*, Journal Meccanica, 2008.
- [8] K. Belaid et A. Miloudi, *Early detection of gear defects by wavelets transform*, 4th International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics, 16-18 December 2008, Sousse, Tunisia.
- [9] Y. Meyer, S. Jaffard et O. Rioul, *L'analyse par ondelettes*, Collection pour la Science, Septembre 1987.
- [10] F. Truchetet, *Ondelettes pour le signal numérique*, Ed. Hermès, Paris, 1998.
- [11] G. Zwingelstein, *Diagnostic des défaillances, théorie et pratique pour les systèmes industriels*, Edition Hermes, 1995.
- [12] P-Y. Arques, N. Thirion-Moreau et E. Moreau, *Les Représentation Temps-Fréquence en Traitement du Signal*, Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle, R 308, Edition 2000, Paris, France.
- [13] Matlab[®], *Wavelet toolbox user's guide*, Edition 2008.
- [14] J. Lin et L. Qu, *Feature Extraction Based on Morlet Wavelet and its Application for Mechanical Fault Dignostic*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 234, Issue 1, 2000, p.135-148.
- [15] A. Boulenger, C. Pachaud, *Aide-mémoire, Surveillance des machines par analyse des vibrations*, Ed. Dunod, 2009.
- [16] A. Boulenger, C. Pachaud, *Diagnostic vibratoire en maintenance préventive*, Ed. Dunod, 1998.