



Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Télécommunications

Spécialité: Systèmes des Télécommunications

Réalisé par :

❖ BOUKAMOUM Ibtissam

et

❖ MALAOUI Sarra

Thème

Diagnostic des défauts d'engrenages à base de la transformée en paquet d'ondelette

Date de soutenance: 01/12/2019

Devant le jury composé de:

SAIDI Mohammed	MAA à l'université de Bouira	Président
AYAD Mouloud	MCA à l'université de Bouira	Rapporteur
CHELBI Salim	MCB à l'université de Bouira	Examineur
ARABI Abderrazak	MCB à l'université de Sétif 1	Examineur

Dédicace

*Merci mon DIEU de m'avoir permis d'arriver jusqu'ici et de m'avoir donné
l'aptitude d'achever ce travail que je dédie particulièrement :*

*À mes très chers et adorables parents qui m'ont inculqué toutes les bases de
mon savoir, que DIEU me les garde.*

*Je dédie aussi ce travail à mon cher frère et mes chères sœurs :
Arselane, T hélieli, Malak*

Pour leur tendresse infinie Je vous aime à l'infini.

*A toute ma grande famille oncles, tantes, cousins, cousines, à leurs époux
et épouses, et leurs enfants, et ma belle famille.*

*A mes très chères amies : Nacira, Yacine, Rabah , Kahina, Saida, Tinhinan, Hanane,
Amina, Asma, Rania.*

A tous mes collègues étudiants de la graduation.

– Promotion 2019–

*A tous ceux qui m'ont témoigné leur affection
et leur soutien durant mon cursus universitaire.*

Ibtissam ✍

Dédicace

Merci mon DIEU de m'avoir permis d'arriver jusqu'ici et de m'avoir donné l'aptitude d'achever ce travail que je dédie particulièrement :

À mes très chers et adorables parents qui m'ont inculqué toutes les bases de mon savoir, que DIEU me les garde.

Je dédie aussi ce travail à chér frère et mes chères sœurs : Mouhamed djawad, AmeL, Karima, Rania, Youssera, Razane.

Pour leur tendresse infinie Je vous aime à l'infini.

A toute ma grande famille oncles, tantes, cousins, cousines, à leurs époux et épouses, et leurs enfants, et ma belle famille.

A mes très chères amies : Nacira, Samir, Toufik, Mouh, , Widdad, Tinhinane, Hanane, Amina, Asma , Rania.

A tous mes collègues étudiants de la graduation.

– Promotion 2019–

A tous ceux qui m'ont témoigné leur affection et leur soutien durant mon cursus universitaire.

Sarrah ✍

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du Département des Sciences et sciences appliquées de l'Université de Bouira.

Je tiens à remercier, en premier lieu, Dr. AYAD Mouloud Directeur de ce mémoire qui a bien voulu nous encadrer pour l'élaboration et le suivi de notre mémoire de master.

Nous remercions également mes sieurs les membres du jury pour la caution qu'ils ont bien voulu apportés à ce travail. Nous adressons nos remerciement et gratitude aux :

Mr. SAIDI Mohammed d'être président du jury de ce mémoire.

Dr. CHELBI Salim et Dr. ARABI Abderrazak d'être examinateurs de ce travail.

Enfin, j'associe à ces remerciements tous ceux qui ont contribué à réaliser ce travail.

Résumé :

Actuellement, la surveillance des machines tournantes est très importante. La détection des défauts évite beaucoup de problèmes, Parce que si les défauts d'engrenage ne sont pas détectés en stade précoce, l'états de la machine continuera à se dégrader et peut être causer de lourdes pertes économiques ou même une catastrophe humaine. Des nombreuses techniques sont utilisées pour détecter ces défauts. Parmi ces méthodes, nous trouvons l'analyse vibratoire. La base de cette technique est d'obtenir la signature des défauts dans les caractéristiques du signal vibratoire. Dans ce travail, nous utilisons la méthode de l'analyse vibratoire par paquets d'ondelette comme un moyen pour chercher les signatures des défauts des systèmes d'engrenage.

Mots clés : Analyse de vibration; transformé en paquets d'ondelettes; signaux vibratoires, défauts d'engrenage

Table de matières

Remerciements	I
Table de matières.....	II
Liste des Figures.....	III
Liste des tableaux	III
Liste des Acronymes et des symboles	IV
Introduction Générale	1
Chapitre 1.....	3
Notions générale sur la transformée en paquet d’ondelette.....	3
1. Introduction:	3
2.Généralité sur l’ondelette :	3
2.1.Définition d’une ondelette :	3
2.2. Famille d’ondelette :	4
2.3. La transformée en ondelette :	5
3. La transformée en paquet d’ondelette :	7
3.1 .Les paquets d’ondelettes :	7
3.2. Construction des paquets d’ondelette :	8
3.4.Principe d’un paquet d’ondelette :	8
3.5.La transformée en paquet d’ondelette :	9
3.6. Localisation des paquets d’ondelettes :	9
3.6.1. Localisation spatiale	9
3.6.2. La localisation fréquentielle :	10
4. Conclusion :	12
Chapitre2.....	13
Validation de la transformée en paquet d’ondelette par des signaux de test.....	13
1. Introduction	13
2. Différentes méthodes d’analyse et traitement de signal :	13
2.1. Analyse temporelle	13
2.2. Analyse spectral.....	13
2.3.Analyse temps-fréquence	14
3.Simulation des signaux de test :	14

3.1. Signal sinusoïdal.....	14
3.2. Effets de modulation :.....	16
3.2.1. Effets de modulation d'amplitude	16
3.2.2. Effets de modulation de la fréquence :	18
3.2.3. Effets de modulation d'amplitude et de fréquence :.....	19
4. Conclusion :	20
1. Introduction :	21
2. Notion général sur les engrenages :	21
2.1. Typologie des engrenages :	22
2.2. Défauts des engrenages.....	23
2.2.1. Défauts de fabrication :.....	23
2.2.2. Défauts de rectification :.....	24
2.2.3. Défauts de montage :	24
2.2.4. Défauts de fonctionnement :.....	24
4. Techniques d'analyse des défauts :	26
4.1. Analyse vibratoire :	28
5. Détection précoce de défauts d'un système d'engrenages par la transformée en paquets d'ondelettes : ...	29
5.1. Description du système étudié	29
5.2. Résultats et discussion	31
5.2.1. Représentation temporelle	32
5.2.2. Représentation par la transformée en paquet d'ondelette.....	34
6. Conclusion:	36
Références Bibliographiques.....	38
Résumé	Erreur ! Signet non défini.

Liste des Figures

La Liste des figures de chapitre I : Notions générales sur la transformée en paquet d'ondelette

Fig. 1.1 . translation et dilatation d'une ondelette	5
Fig. 1.2. Principe de la Transformée en ondelette Continue	6
Fig. 1.3. Balayage de l'ondelette sur signal pour calculer « TOC ».....	6

Fig. 1.4. Coefficients d'ondelettes pour une base d'ondelettes de niveau 5	7
Fig. 1.5. Transformée en paquet d'ondelette	9
Fig. 1.6. Suivit des déférentes bandes de fréquences au cours des décompositions avec les filtres h et g..	10

La liste des figure de chapitre II : Validation de la transformée en paquet d'ondelette par des signaux de test

Fig. 2. 1: Signal sinusoïdal	15
Fig. 2.2 : Signal modulé en amplitude	17
Fig .2.3: Signal modulé en fréquence	18
Fig.2.4:Signal modulé en amplitude et en fréquence	19

La Liste des figures de chapitre III : Diagnostic des défauts d'engrenage par la transformée en paquet d'ondelette

Fig. 3.1 : Système d'engrenage	22
Fig. 3.2 : Classification des engrenages	23
Fig. 3.3 : Défauts de l'usure	25
Fig. 3.4: Défauts de piquûre	25
Fig. 3. 5 : Défauts de l'écaillage	26
Fig. 3.6 : Défauts de fissuration	26
Fig. 3.7: Utilisation des techniques d'analyse.	28
Fig. 3.8 : Schéma repésentatif du réducteur de CETIM	30

Liste des tableaux

La liste des tableaux de chapitre I : : Notions générales sur la transformée en paquet d'ondelette

Tab. 1.1 . Familles d'ondelettes	4
Tab. 1.2 .Correspondance entre le numéro du paquet d'ondelettes et le numéro de la bande de fréquence correspondante.....	Erreur ! Signet non défini.

La liste des tableaux de chapitre III : Diagnostic des défauts d'engrenage par la transformée en paquet d'ondelette

Tab. 3.1. Techniques d'analyse de l'état d'une machine tournante	27
Tab. 3.2. Caractéristiques du banc d'essai de CETIM	30
Tab. 3. 3. Rapport d'expertise	31
Tab. 3.5. Approximation et détail des signaux vibratoires issus du réducteur de CETIM.....	35

Liste des Acronymes et des symboles

• Acronymes

- AMR Adaptive multi-rate
- CETIM Centre d'Études Techniques des Industries Mécanique
- FFT Une transformée de Fourier rapide
- HHT Hilbert-Huang Transform
- STFT Short Time Fourier Transform
- TF Une transformée de fourrier
- TFCT La transformée de Fourier à courte terme
- TO La Transformé en ondelette
- TOC La transformée en ondelette continue
- TOD La Transformée en ondelette discrète
- WPT Wavelet packet Transform

• Symboles

- $\psi(t)$ l'ondelette mère
- $\psi_{a,b}(t)$ Famille d'ondelette
- ψ support compact
- \sqrt{a} Permet d'assurer la même énergie pour l'ondelette dilatée
- a le paramètre de localisation fréquentielle
- b le paramètre de localisation temporelle
- \mathbb{R}^N un algorithme de décomposition d'une suite
- $\mathbb{R}^{N/2}$ Un algorithme de décomposition
- f_r Fréquence de rotation
- f_1 et f_2 Fréquence de rotation des roues 1 et 2 respectivement
- Z_1 Le nombre de dents de roue 1
- Z_2 Le nombre des dents de roue 2
- H_K Filtre passe- bas
- G_K Filtre passe- haut

Introduction Générale

Le traitement du signal est une approche largement utilisée dans divers domaines. Plusieurs types de techniques avancées, de traitement du signal, ont été proposés dans les dernières décennies et ajoutés à celles existantes. Étant donné que chaque technique a une base théorique différente, les résultats obtenus sont généralement différents. Par conséquent, il est important de choisir la technique la plus efficace pour la situation en cours de test en vue d'obtention de résultats fiables. Parmi ces méthodes, nous trouvons l'analyse vibratoire. La base de l'analyse vibratoire est d'obtenir la signature du défaut dans les caractéristiques du signal vibratoire. La complexité du signal vibratoire est dans ses caractéristiques non-linéaire, non stationnaire, et très bruité. L'objectif est de proposer une méthode pour surmonter ces difficultés.

L'analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier a été depuis longtemps l'outil le plus utilisé pour le traitement des signaux émis par les systèmes. Cette technique classique demeure désormais limitée du fait que la plupart des signaux contiennent des caractéristiques transitoires ou non stationnaires. Ces caractéristiques sont la partie la plus importante du signal et l'analyse de Fourier n'est pas adaptée [1].

Lors de la transformation au domaine fréquentiel par l'analyse spectrale, l'information du temps est perdue, on est ainsi incapable de définir quand un événement prend place. Afin de dépasser ces inconvénients, la transformée en ondelette a été introduite. Cette technique a une bonne propriété de localisation en temps et en fréquence [2].

La transformée en paquet d'ondelette est une généralisation de la transformée en ondelette. Ils permettent une analyse plus fine en décomposant les espaces de détail qui ne sont jamais décomposés dans le cas des ondelettes.

L'objectif principal de ce travail est l'utilisation de la méthode de l'analyse vibratoire par la transformée en paquets d'ondelettes comme un moyen pour chercher les signatures des défauts des systèmes d'engrenage. Pour montrer l'efficacité de l'approche, la transformée en paquet d'ondelette est appliquée pour l'analyse des signaux vibratoires issue d'un système d'engrenage afin de détecter la présence d'un défaut. D'abord, on va appliquer la transformée en paquet d'ondelettes sur des signaux de test standard disponibles dans la littérature. La deuxième phase est réservée à l'application de la transformée en paquet d'ondelette sur des

Signaux vibratoires réels pour détecter la présence d'un défaut dans un système d'engrenages. Le mémoire est organisé en trois chapitres :

D'abord, le contexte théorique sur la transformée en paquet d'ondelette est introduit.

Le deuxième chapitre sera consacré pour la validation de la transformée en paquet d'ondelette par des signaux de test.

Le troisième chapitre est dédié à l'application de la méthode sur des signaux réels issus d'un banc d'essai expérimental.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion général

Chapitre 1 :

Notions générales sur la transformée en paquet d'ondelette

1. Introduction:

La transformée en ondelettes (TO), contrairement à la transformée de Fourier, ne se limite pas à une technique d'analyse fréquentielle. En appliquant la transformée en ondelettes à un signal, on peut observer son comportement dans le domaine à la fois fréquentiels et temporels. Cette analyse temps-fréquence la mène à appartenir au groupe d'analyse de méthodes multi-échelle tel que la transformée de Fourier à fenêtre glissante et la transformée en cosinus. Le principe de base consiste à convoluer le signal analysé avec une fonction appelée ondelette.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les ondelettes, la transformée d'ondelette, la construction et le principe d'un paquet d'ondelette et transformée en paquet d'ondelette que nous allons utiliser dans la suite de ce travail.

2. Généralité sur l'ondelette :

2.1. Définition d'une ondelette :

Une ondelette est une fonction élémentaire, à valeurs réelles ou complexes, très concentrée à la fois en temps et en fréquence. Elle doit répondre à deux critères :

1- Elle doit avoir un support compact, c'est-à-dire qu'elle se localise sur un petit intervalle de temps.

2- Elle doit être de moyenne nulle.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (1.1)$$

Une fonction $\psi \in L^1(\mathbb{R}) \cap L^2(\mathbb{R})$ est une ondelette si elle vérifie la condition d'admissibilité :

$$\int_{\mathbb{R}^+} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega = \int_{\mathbb{R}^-} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty \quad (1.2)$$

C'est la condition d'admissibilité car c'est cette condition qui a donné le nom d'ondelette [3].

2.2. Famille d'ondelette :

Il y a plusieurs ondelettes mères utilisées pour le calcul de la transformée en ondelette des signaux analysés. Chacune d'entre elles a un domaine d'application défini de la forme du signal étudié. Le tableau suivant contient les familles les plus utilisées [4].

Nom des familles d'ondelettes	Abréviation
Ondelette de Haar	Haar
Ondelettes de Daubechies	Db
Ondelettes Symplets	Sym
Ondelettes coiflets	Coif
Ondelettes biorthogonales	Bior
Ondelettes de Meyer	Meyr
Ondelettes gaussienne	Gaus
Ondelettes gaussienne complexes	Cgaus
Ondelettes Mexicain	Mexh
Ondelettes de Morlet	Morl
Ondelettes de Morlet complexes	Cmor
Ondelettes de Shannon complexes	Shan

Tab. 1.1 . Familles d'ondelettes

2.3. La transformée en ondelette :

L'idée de l'ondelette est de pouvoir faire varier les largeurs en temps et en fréquences d'une fonction tout en la translatant le long du signal comme dans la transformée de Fourier fenêtrée [3].

La transformée en ondelettes s'écrit de manière général

$$C_f(a, b) = \int_{\mathbb{R}} f(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt \quad (1.3)$$

A partir de l'ondelette mère $\psi(t)$; on construit par translation et dilatation une famille de fonctions $\psi_{a,b}(t)$ qui en sont les atomes de base. Ces fonctions de $\psi_{a,b}(t)$ sont données par la relation suivante[3] :

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1.4)$$

Le paramètre (b) de l'ondelette représente sa translation sur l'axe du temps, par contre le paramètre (a) donne le contrôle de la fréquence de l'ondelette, sachant que $a=1/f$. « f » étant la fréquence

Si $a < 1$, l'ondelette $\psi_{a,b}(t)$ devient très concentrée par rapport à l'ondelette mère $\psi(t)$ et son contenu fréquentiel penchera vers les hautes fréquences du plan d'analyse.

Si $a > 1$, l'ondelette $\psi_{a,b}(t)$ est très large, et le contenu fréquentiel penchera vers les basses fréquences du plan d'analyse .

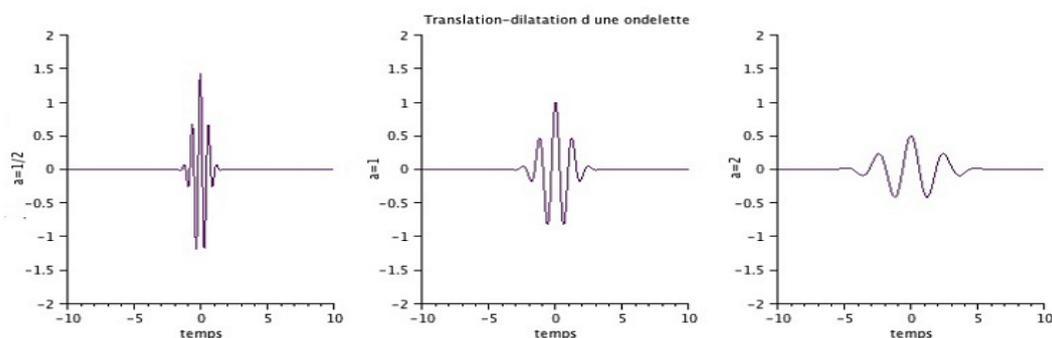


Fig. 1.1 . Translation et dilatation d'une ondelette [2]

Il y a plusieurs types de la transformée en ondelette ; les principaux sont :

➤ **La transformée en ondelette continue (TOC):**

Elle est semblable à la transformée de Fourier à courte terme (TFCT), seulement la fenêtre glissante utilisée pour l'analyse est variable en fonction du temps. Donc TOC utilise des translations et des dilatations de la fonction ondelette mère durant tout l'intervalle temporel de manière continue.

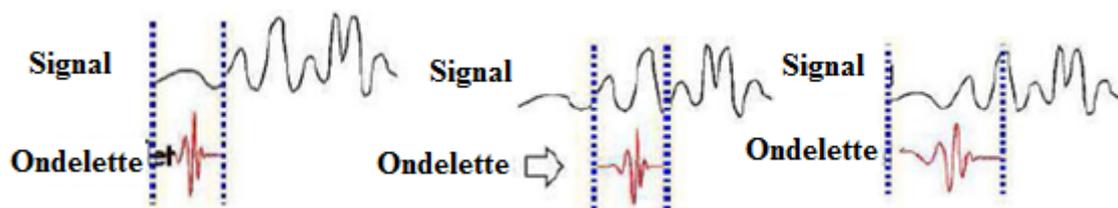


Fig. 1.2. Principe de la Transformée en ondelette Continue [5]

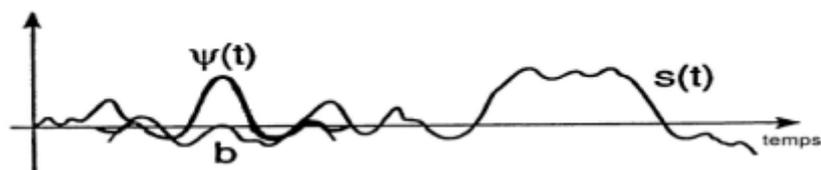


Fig. 1.3. Balayage de l'ondelette sur signal pour calculer « TOC »[3]

La transformée en ondelette continue est une fonction de deux paramètres « a » pour les paramètres d'échelle, et « b » pour les paramètres de translation.

La transformée en ondelette continue d'une fonction $x(t) \in L^2(\mathbb{R})$ est définie dans le domaine temporel par le produit scalaire suivant [6] :

$$X_{T(a,b)} = \langle x, \psi_{a,b} \rangle \quad (1.5)$$

Alors :

$$X_{T(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1.6)$$

En effectuant le changement de variable $t_1 = \frac{t}{a}$ on aura :

$$X_{T(a,b)} = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} x(at_1) \psi^*\left(t_1 - \frac{b}{a}\right) dt_1 \quad (1.7)$$

b : est le paramètre de localisation temporelle.

a : est le paramètre de localisation fréquentielle.

\sqrt{a} : permet d'assurer la même énergie pour l'ondelette dilatée.

➤ **Transformée en ondelette discrète (TOD) :**

Lorsque les paramètres d'échelle et de translation a et b prennent des valeurs discrètes avec :

$$a = 2^j \text{ et } b = n2^j, \text{ Où } j \text{ et } n \text{ sont des nombres entiers.}$$

On obtient alors la transformation en ondelettes discrètes (TOD) définie par la relation suivante :

$$\mathcal{W}_f(i, m) = 2^{-\frac{i}{2}} \sum_{n \in \mathbb{Z}} f(n) \psi\left(\frac{n}{2^i} - m\right) \quad (1.8)$$

L'inconvénient majeur de TOD est qu'elle produit un nombre élevé de coefficients pour représenter un signal exigeant un temps de calcul élevé pour reconstituer le signal d'origine.

La TOD décompose le signal en deux parties [7] :

- Les approximations qui correspondent à la basse fréquence
- Les détails qui correspondent à la haute fréquence

3. La transformée en paquet d'ondelette :

3.1 .Les paquets d'ondelettes :

Les paquets d'ondelettes sont une généralisation de la décomposition en ondelette. Ils permettent une analyse plus fine en décomposant les espaces de détail qui ne sont jamais décomposés dans le cas des ondelettes [8]. Ils ont été introduits par Coifman, Meyer et Wickerhauser au début des années 1990. Le principe est en quelque sorte de découper en tranches fréquentielles les espaces de détail.

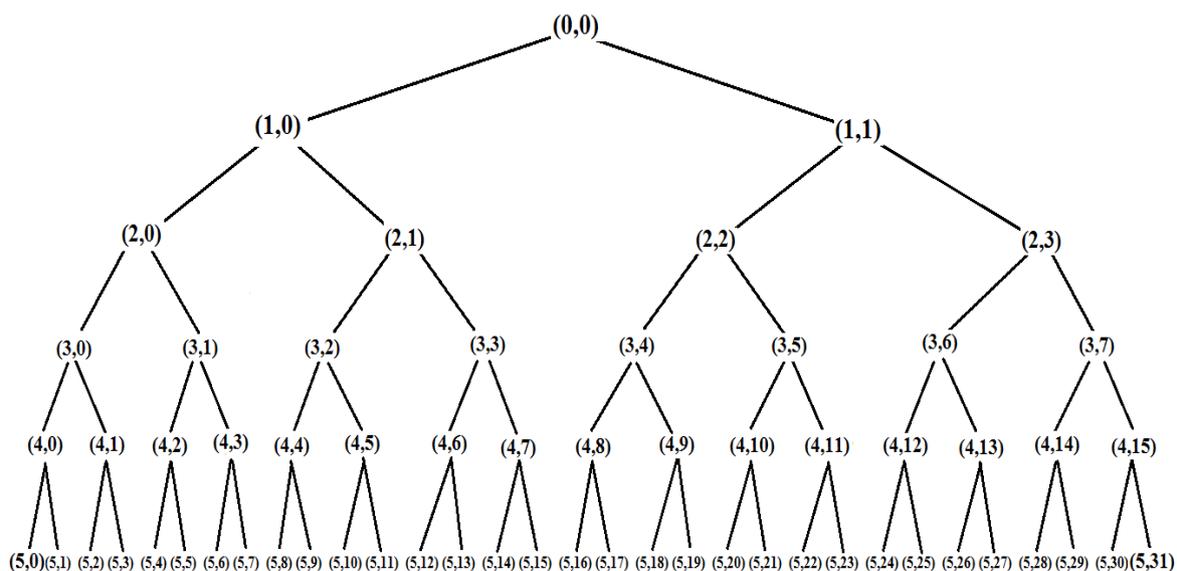


Fig. 1.4. Coefficients d'ondelettes pour une base d'ondelettes de niveau 5 [9].

Un arbre décrivant les décompositions à effectuer comme chaque décomposition est linéaire et inversible, son résultat correspond à des coordonnées du signal de départ dans une base. Faire successivement plusieurs décompositions revient à composer plusieurs changements de bases. C'est donc toujours un changement de base.

Par ailleurs, si tous les changements de bases correspondent à des bases orthogonales, la composition de ces changements de bases orthogonales est toujours un changement de base orthogonale.

Ainsi, on pourra toujours parler de bases orthogonales ou biorthogonales de paquets d'ondelettes. De plus, les conditions sur les filtres H et G pour obtenir des bases orthogonales et biorthogonales sont les mêmes que pour les bases d'ondelettes.

3.2. Construction des paquets d'ondelette :

La génération des paquets d'ondelettes se fait par récurrence. On part des deux filtres de longueur N, g_n et h_n , associés à l'ondelette orthogonale à support compact ψ et la fonction d'échelle φ de L^2 .

Par induction, on définit la suite de fonctions $(w_n)_{n \in \mathbb{N}}$; en partant de $w_0 = \varphi$, par :

$$\begin{cases} w_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{2N-1} h_k w_n(2t - k) \\ w_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{2N-1} g_k w_n(2t - k) \end{cases} \quad (1.9)$$

L'équation pour $n = 0$ se réduit simplement aux deux équations aux deux échelles et on a $w_0 = \varphi$, la fonction d'échelle et par suite $w_1 = \psi$, l'ondelette. On voit ainsi en quoi les paquets généralisent les ondelettes. Plus généralement, en partant d'une ondelette orthogonale plus régulière, on obtient des versions lissées de ce système de fonctions, toutes à support inclus dans $[0; 2N-1]$ [4].

3.4. Principe d'un paquet d'ondelette :

A la base de la décomposition en ondelettes, il y a :

- un algorithme de décomposition d'une suite de R^N en deux suites de $R^{\frac{N}{2}}$.
- un algorithme de recomposition des deux suites de $R^{\frac{N}{2}}$ en une suite de R^N .

Ces algorithmes sont inverses l'un de l'autre

Pour les paquets d'ondelettes, on utilise la même décomposition/recomposition de signaux que les ondelettes mais on s'autorise, à chaque niveau, à décomposer le signal représentant les basses fréquences et/ou le signal représentant les hautes fréquences.

La décomposition en paquets d'ondelettes est donc caractérisée par :

- Deux filtres h et g.
- Un arbre décrivant les décompositions à effectuer.

On peut décomposer tant que la taille du signal est plus grande que la taille des filtres. Faire successivement plusieurs décompositions revient à composer plusieurs changements de bases. C'est donc toujours un changement de base [8].

3.5. La transformée en paquet d'ondelette :

L'arbre de décomposition en paquets d'ondelettes est leur représentation dans la figure suivante

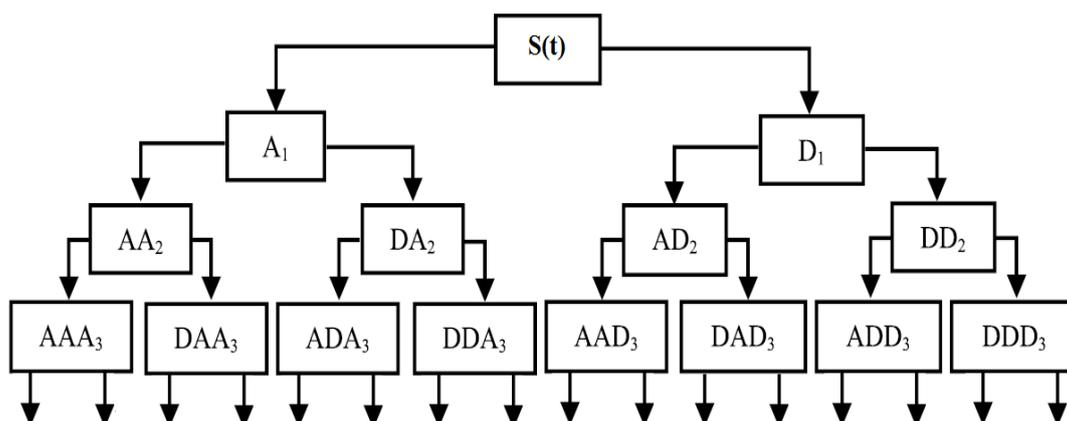


Fig. 1.5. Transformée en paquet d'ondelette [9].

Dans l'analyse en paquets d'ondelettes, les détails aussi bien que les approximations peuvent être décomposés. Ceci rapporte plus de $(2n+1)$ de différentes décompositions du signal.

La méthode de paquets d'ondelettes est une généralisation de la décomposition en ondelettes qui offre une gamme plus riche de possibilités pour l'analyse du signal.

L'approximation est alors elle-même coupée en approximation et détail de deuxième niveau, et le processus est répété. Pour une décomposition de « n »niveau, il y a $(n+1)$ manières possibles de décomposition ou coder le signal [6].

3.6. Localisation des paquets d'ondelettes :

3.6.1. Localisation spatiale

Les principes expliquant la localisation spatiale des éléments de la base de paquets d'ondelettes sont similaires à ceux expliquant la localisation des ondelettes. Un élément de la base de paquets d'ondelettes correspondant à un niveau de décomposition j est translaté tous les 2^j pixels. Le calcul de ses coefficients s'est fait en sous-échantillonnant j fois par un facteur 2. La taille du support d'un élément de la base de paquets d'ondelettes du niveau j est comprise entre $2^j \min(|h|, |g|)$ et $2^j \max(|h|, |g|)$.

On considère donc généralement que plus le niveau de décomposition du coefficient d'ondelette est élevé, plus sa localisation spatiale est mauvaise [10].

3.6.2. La localisation fréquentielle :

Pour suivre ce qui se passe dans le domaine fréquentiel, lorsque l'on décompose un signal $u \in R^N$:

$$\widehat{u^1}_k = \frac{1}{2} (\widehat{h}^*_k \widehat{u}_k + \widehat{h}^*_{k+\frac{N}{2}} \widehat{u}_{k+\frac{N}{2}}) \quad (1.10)$$

$$\widehat{u^2}_k = \frac{1}{2} (\widehat{g}^*_k \widehat{u}_k + \widehat{g}^*_{k+\frac{N}{2}} \widehat{u}_{k+\frac{N}{2}}) \quad (1.11)$$

Ces formules nous donnent la transformée de Fourier des signaux obtenus après la décomposition en fonction de la transformée de Fourier du signal u .

Rappelons aussi que dans le cadre des ondelettes, h est typiquement passe-bas et g passe haut. Pour simplifier l'analyse, on suppose $\widehat{h}_k \sim 0$, pour $k \in \{-\frac{N}{4}, \dots, \frac{N}{4}\}$ (1.12)

$$\widehat{g}_k \sim 0, \text{ pour } k \notin \{-\frac{N}{4}, \dots, \frac{N}{4}\} \quad (1.13)$$

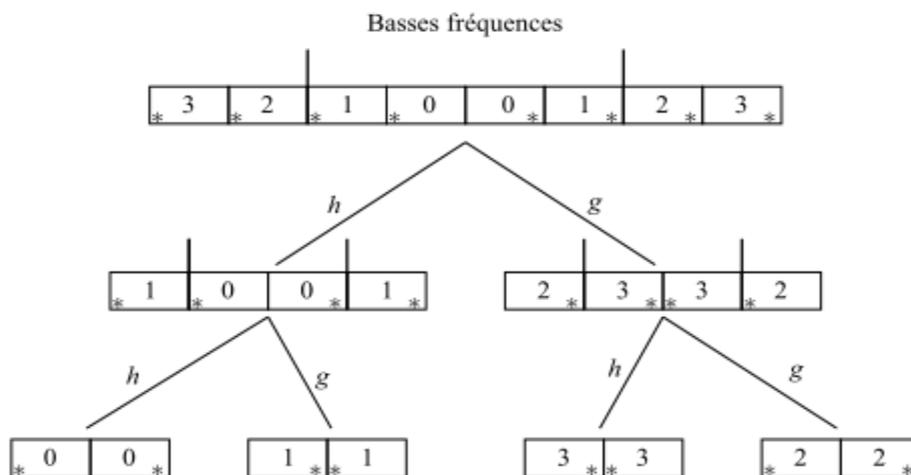


Fig. 1.6. Suivit des déférentes bandes de fréquences au cours des décompositions avec les filtres h et g [13]

Ainsi, lors d'une première décomposition on obtient le résultat schématisé sur la Figure.1.6:

- La transformée de Fourier du résultat de la décomposition utilisant h (c.à.d. u^1) correspond aux basses fréquences de u (les bandes 0 et 1).

– La transformée de Fourier du résultat de la décomposition utilisant g (c.à.d. u^2) correspond aux hautes fréquences de u (les bandes 2 et 3), mais l'ordre de ces hautes fréquences est inversé, du fait de la formule de Poisson.

Si l'on décompose à nouveau u^2 (ce que l'on ne faisait pas avec les ondelettes mais que l'on peut faire avec les paquets d'ondelettes) :

– Les basses fréquences de u^2 (c.à.d. les bandes 3) correspondent à la transformée de Fourier de la décomposition avec h .

– Les hautes fréquences de u^2 (c.à.d. les bandes 2) correspondent à la transformée de Fourier de la décomposition avec g .

On généralise l'observation qui est faite ci-dessus de la façon suivante : Un paquet d'ondelettes décomposé au niveau j va être localisé sur une bande de fréquence

$$\left\{ -(k+1)\frac{N}{2^{j+1}} \dots, -k\frac{N}{2^{j+1}} \right\} \cup \left\{ k\frac{N}{2^{j+1}} \dots, (k+1)\frac{N}{2^{j+1}} \right\} \quad (1.14)$$

pour un certain $k \in \{0, \dots, 2^j - 1\}$ bien choisi.

Pour établir la correspondance entre un des éléments de la base de paquets d'ondelettes du niveau j et le bon nombre entier $k \in \{0, \dots, 2^j - 1\}$, on numérote les 2^j nœuds possibles au niveau j de gauche à droite. Le nœud numéroté par p correspond à la bande de fréquence repéré par $k = G(p)$, où la fonction G est construite par récurrence :

$$G(0)=0, G(1)=1$$

Et pour $j'=1, 2, \dots, j-1$ et $p \in \{2^{j'-1} \dots 2^j - 1\}$

$$\text{Si } G(p) \text{ est pair } \begin{cases} G(2p) = 2G(p) \\ G(2p+1) = 2G(p) + 1 \end{cases} \quad (1.15)$$

$$\text{Si } G(p) \text{ est impair } \begin{cases} G(2p) = 2G(p) + 1 \\ G(2p+1) = 2G(p) \end{cases} \quad (1.16)$$

Les premiers éléments de la suite G sont donnés dans le Tab.1.2

On peut donc atteindre n'importe quelle partition du domaine fréquentiel. Bien sûr, si l'on cherche à être trop précis dans le domaine fréquentiel, on aboutira à des niveaux

décomposition élevé et donc à une faible localisation en espace (ce qui n'est généralement pas souhaitable).

En fin cette analyse n'est pertinente que dans la mesure où les filtres h et g sont eux même bien localisés en fréquences (i.e. ils ont un nombre élevé de moments nuls). Cette analyse n'a, par exemple, qu'une portée très limitée avec l'ondelette de Haar qui n'est pas du tout localisée en fréquence [10].

4. Conclusion :

Ce chapitre a sommairement présenté les bases de la transformée en ondelettes, avant de réaliser une analyse par ondelettes, il faut choisir la fonction analysante (L'ondelette mère). La forme de l'ondelette est importante, mais il est important aussi de bien choisir sa durée et sa largeur de bande. Ces deux paramètres déterminent les résolutions de la transformée dans les domaines temporel et fréquentiel.

Finalement on a discuté sur la décomposition en paquets d'ondelettes on a conclu quand lorsque on descend dans l'arbre, les bandes de fréquences sont de plus en plus étroites et l'information concentré sur de moins en moins de points et le nombre minimum de niveaux de décomposition nécessaire pour obtenir un signal d'approximation de sorte que la limite supérieure de sa bande de fréquence associée soit sous ou au voisinage de la fréquence fondamentale.

Dans le chapitre suivant, on va applique la transforme en paquet d'ondelettes sur des signaux de tests standards tels que un signal sinusoïdal, signal avec effets de modulation d'amplitude, signal avec effets de modulation de fréquence et en fin signal avec les deux modulations d'amplitude et de fréquence.

Chapitre 2 :

Validation de la transformée en paquet d'ondelette par des signaux de test

1. Introduction

Ce chapitre est réservé à la validation de la transformée en paquet d'ondelette. Pour cela, on a utilisé des signaux de test disponibles dans la littérature. On va appliquer la transformée en paquet d'ondelettes sur des signaux de test standard tels que un signal sinusoïdal, signal avec effets de modulation d'amplitude, signal avec effets de modulation de fréquence et en fin signal avec les deux modulations d'amplitude et de fréquence. Le critère de choix de ces signaux est basé sur le type des signaux vibratoires réel sur lequel on va tester cette approche de la transformée en paquet d'ondelette. Nous avons opté pour l'environnement de programmation et de simulation le logiciel MATLAB (R2014a).

2. Différentes méthodes d'analyse et traitement de signal :

Selon le domaine d'analyse, on distingue trois classes des techniques utilisées pour l'analyse vibratoire: l'analyse temporelle, l'analyse spectrale et l'analyse temps-fréquence.

2.1. Analyse temporelle

La représentation temporelle ne donne aucune information sur le contenu fréquentiel d'un signal. L'analyse temporelle peut se faire en utilisant des descripteurs obtenus à partir d'une valeur scalaire calculée directement sur la totalité d'un signal par les méthodes statistiques. Elle peut se faire également par des méthodes plus spécifiques telles que la démodulation d'amplitude et la démodulation de phase. Ces méthodes peuvent être utilisées dans la phase de prétraitement ou dans la phase de décision [11].

2.2. Analyse spectral

C'est la technique la plus ancienne basée sur la transformée de Fourier, le mot spectre est un terme scientifique introduit par l'ingénieur français Jean Baptiste Fourier (1822), célèbre transformée qui porte toujours son nom, parmi ces travaux les plus marquants : la naissance d'un algorithme permettant une transformée de Fourier rapide FFT.

Mathématiques la transformée de Fourier c'est la différence périodicité contenu dans le signal original [12].

2.3. Analyse temps-fréquence

On trouve plusieurs méthodes tels que: STFT (Short Time Fourier Transform), HHT (Hilbert-Huang Transform), Transformée en ondelette et autres. Dans l'analyse temps-fréquence, l'analyse par paquet d'ondelettes est une méthode de traitement de signaux récente transitoires qui a fait l'objet de plusieurs applications [13].

3. Simulation des signaux de test :

Le problème de détection est considéré comme une simple recherche de la signature dans le domaine temps-échelle par l'utilisation des signaux. Pour évaluer les performances et l'efficacité de cette méthode. Nous avons prié quatre exemples des signaux dans notre simulation sous Matlab par la transformée en paquet d'ondelette qui sont : un signal sinusoïdal, signal avec effets de modulation d'amplitude, signal avec effets de modulation de fréquence et en fin signal avec les deux modulations d'amplitude et de fréquence. Nous avons utilisée l'ondelette de Haar et l'ordre des approximations et des détails c'est l'ordre 4.

3.1. Signal sinusoïdal

Le signal sinusoïdal est composé d'une seule fréquence fondamentale de 100Hz selon l'équation suivante :

$$s(t) = 1. \sin(2. \pi. 100. t) \quad (2.1)$$

Un signal sinusoïdal représente généralement la manifestation vibratoire d'un déséquilibre, d'un engrènement parfait et d'un déversement de la bague fixe d'un roulement [16].

Les résultats de simulation dans le domaine temporelle, fréquentiel et en transformée en paquet d'ondelette sont donnés sur les figures suivantes:

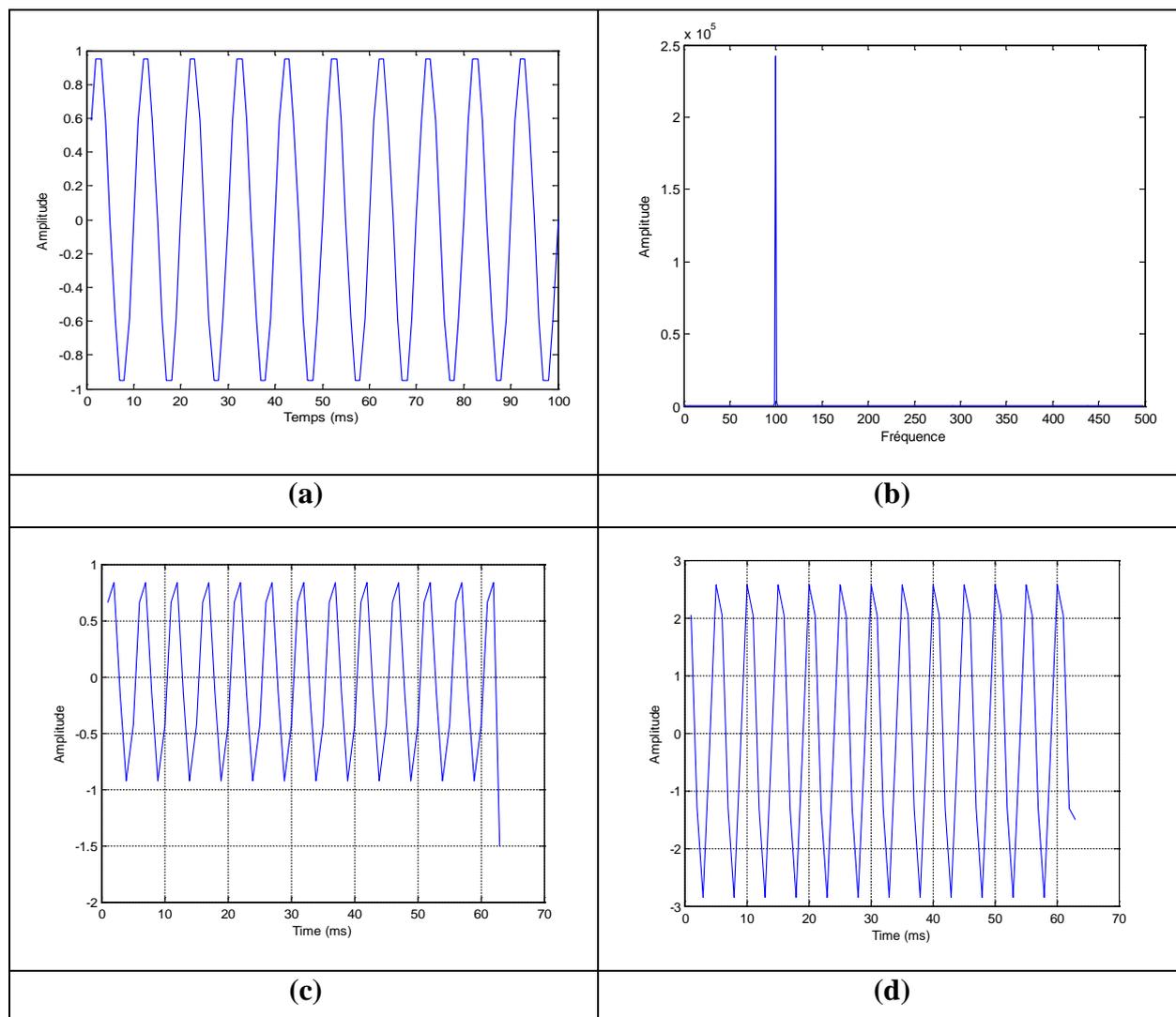


Fig. 2.1. Signal sinusoïdal

Avec : (a) Représentation temporelle, (b) Spectre de fréquence, (c) approximation (d) détail

Le signal sinusoïdal, dans le domaine temporel est illustré sur la Fig.2.1.(a) et son spectre de fréquence est illustré sur la Fig.2.1.(b). La décomposition en série de Fourier est un outil simple et pratique pour trouver le spectre d'un signal périodique. L'analyse par la FFT du signal sinusoïdal simple donne une oscillation avec un seul pic correspond à la fréquence de sinusoïde, en ordonnée, un nombre proportionnel à l'amplitude de l'oscillation.

Pour la représentation en transformée en paquet d'ondelette, le signal est décomposé en approximation Fig.2.1 (c) et en détail Fig.2.1 (d). Pour un signal simple composé d'une seule fréquence, la décomposition en approximation et en détail est presque la même.

3.2. Effets de modulation :

Les engrenages génèrent des vibrations à la fréquence d'engrènement (à la fréquence fondamentale) et ses harmoniques, qui sont en général différentes pour chaque paire d'engrenages. Ainsi, des changements dans le spectre, comme une augmentation de l'amplitude de la vibration à une fréquence particulière ou l'apparition de bandes latérales de modulation sur cette fréquence, peuvent souvent être attribuées à un élément unique dans un système complexe de la fréquence à laquelle se produit le changement. Par exemple, Randall a expliqué la modulation d'amplitude par la sensibilité de l'amplitude de vibration de la charge de la dent. Si la charge varie pendant l'engrènement alors l'amplitude de la vibration doit varier en conséquence. Un certain nombre de défauts peut donner lieu à une modulation d'amplitude. Les défauts qui donnent lieu à une modulation d'amplitude sont généralement classés selon le comportement du défaut dans le domaine temporel du signal vibratoire, par exemple: Les défauts localisés tels que des piqûres sur une seule dent produisent une impulsion courte dont la durée est similaire à celle de la période d'engrènement de dent, et avec une périodicité égale à celle de l'engrenage. Les défauts distribués tels que l'excentricité d'engrenage produisent une modulation continue à une fréquence correspondant à la vitesse de rotation de l'engrenage [11].

Les fluctuations de la charge de contact de la dent ne causeront pas seulement une modulation d'amplitude du signal vibratoire, mais aussi une modulation de fréquence de la fréquence d'engrènement de dents. En fait, les mêmes fluctuations de la pression de contact de la dent qui donnent naissance à une modulation d'amplitude doivent en même temps appliquer un couple fluctuant à l'engrenage ; ce qui entraîne des fluctuations de la vitesse angulaire à la même fréquence. Le rapport entre les effets de modulation de fréquence aux effets de modulation d'amplitude est, en général, en fonction de l'inertie des pièces en rotation; plus cette inertie est grande, moins seront les effets de modulation de fréquence par rapport aux effets de modulation d'amplitude [13].

3.2.1. Effets de modulation d'amplitude

Le signal de test, modulé en amplitude avec une fréquence porteuse de 75 Hz et une fréquence du signal modulant de 3Hz, est donné par l'équation suivante :

$$s(t) = [1 + 0.5 \times \sin(6 \times \pi \times t)] \times \sin(150\pi t) \quad (2.2)$$

Les résultats de simulation de signal modulée dans le domaine temporelle, fréquentiel et en transformée en paquet d'ondelette sont donnés sur les figures suivantes:

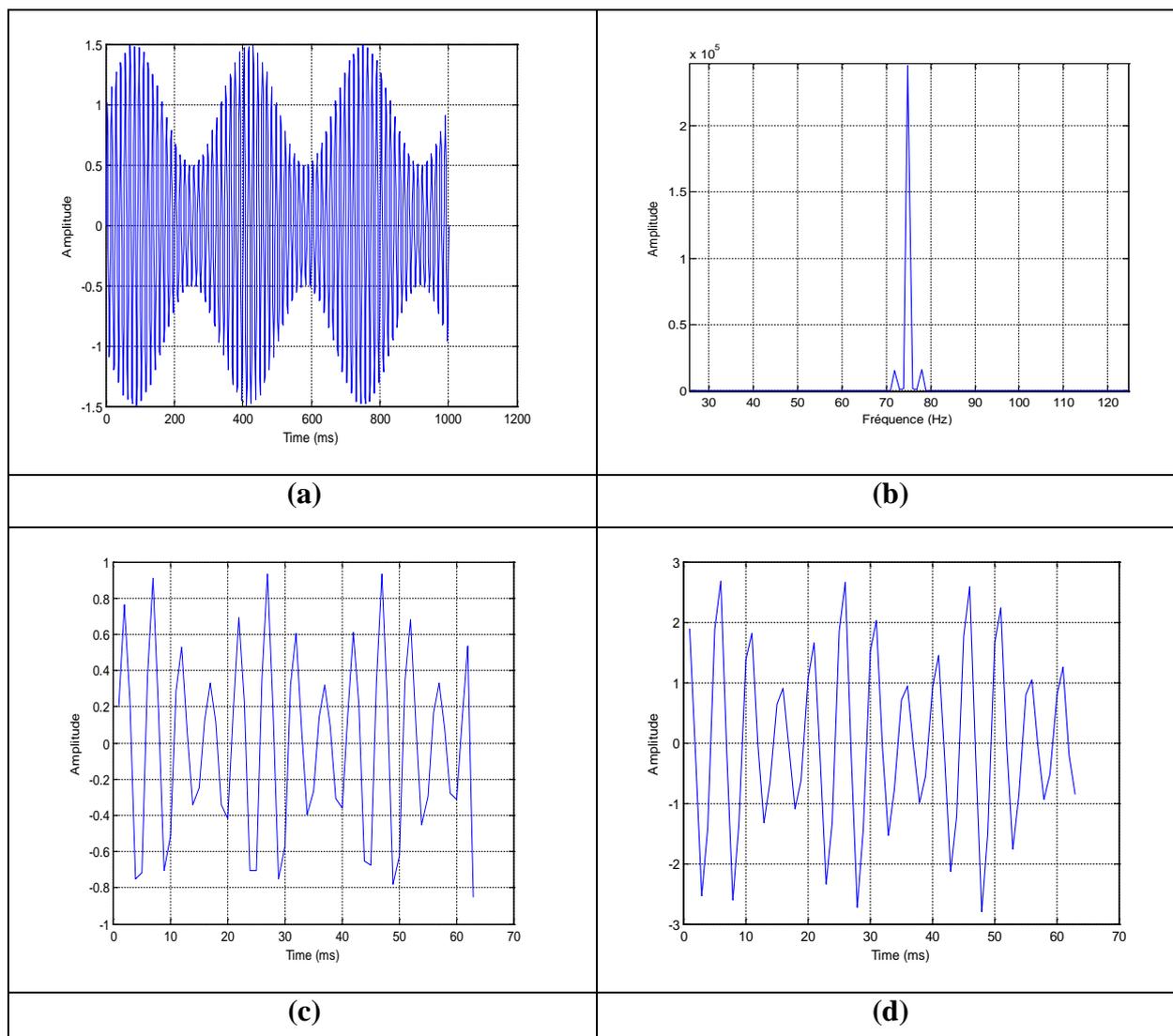


Fig. 2.1. Signal modulé en amplitude

Avec : (a) Représentation temporelle, (b) Spectre de fréquence, (c) approximation (d) détail

Le signal sinusoïdal, dans le domaine temporel est illustré sur la Fig.2.2. (a) et son spectre de fréquence est illustré sur la Fig.2.2. (b).

Un signal modulé en amplitude représente la manifestation vibratoire de l'engrènement d'un train d'engrenages dont un des arbres présente une forte excentration, cette modulation peut être déterminée parfaitement par le calcul de l'amplitude instantanée. Quelques effets de modulation d'amplitude sont causés par les défauts géométriques, d'assemblage et par des défauts locaux des engrenages [14].

Le spectre de fréquence obtenu par la Transformée de Fourier se limitera alors aux trois pics, un pic correspond à la fréquence de signal porteuse (75 Hz) avec des pics latéraux

espacés de la fréquence de modulation (3 Hz) et dont l'ordonnée respective sera proportionnelle à l'amplitude de chacune des signaux. La représentation en transformée en paquet d'ondelette est présentée en approximation Fig .2.2 .(c) et en détail Fig .2.2. (d) La décomposition d'un signal modulé en amplitude donne des oscillations avec plusieurs pics mais d'amplitudes différentes.

3.2.2. Effets de modulation de la fréquence :

Le signal Chirp est caractérisé par une modulation de fréquence linéaire. Ce signal est utilisé dans diverses applications. L'équation du signal Chirp est donnée par:

$$s(t) = \cos(2 \times (10 + 80.t) \times \pi.t) \quad (2.3)$$

Les résultats de simulation de signal modulée en fréquence sont donnés sur la Fig. 2.3 :

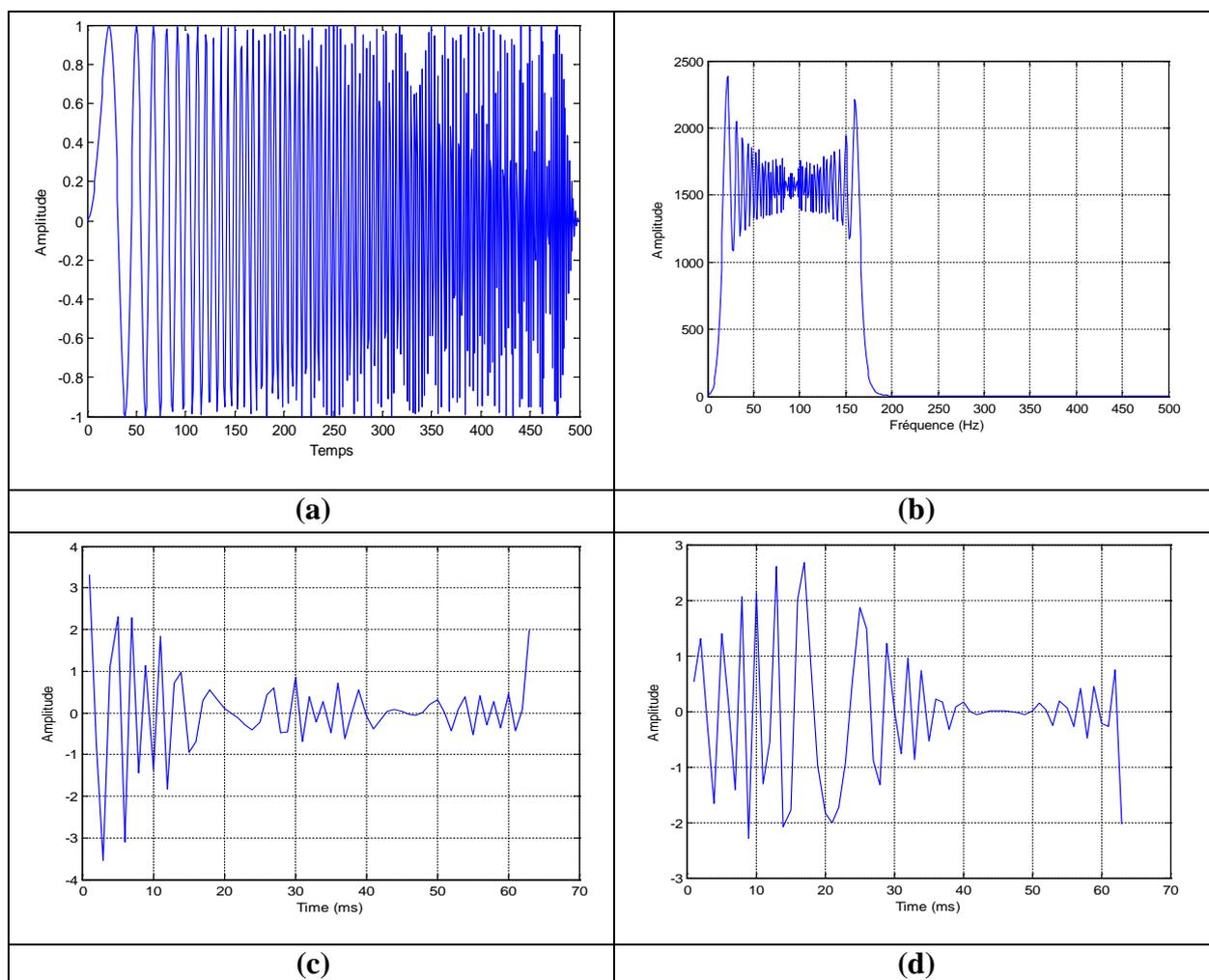


Fig. 2.2. Signal modulé en fréquence :

Avec : (a) Représentation temporelle, (b) Spectre de fréquence, (c) approximation (d) détail

D'après la Fig.2. 3 (a), la représentation temporelle du signal Chirp est un signal avec une amplitude constante, tandis que la fréquence change d'une valeur basse en une valeur

haute. Le spectre de fréquence obtenu par FFT montre le balayage des fréquences. La fréquence de signal change d'une valeur basse en une valeur haute. Le signal Chirp est caractérisé par une modulation de fréquence linéaire. Son contenu fréquentiel couvre la bande passante du signal Chirp. La représentation en transformée en paquet d'ondelette de ce signal montre la présence cette modulation de fréquence.

3.2.3. Effets de modulation d'amplitude et de fréquence :

Le signal de test modulé en amplitude et en fréquence est donné par l'équation suivante :

$$s(t) = [1 + 0.5 \times \sin(6 \times \pi \times t)] \times \sin(100 \times \pi \times t^2) \quad (2.4)$$

Les résultats de simulation de signal modulée en amplitude et en fréquence sont donnés sur les figures suivantes :

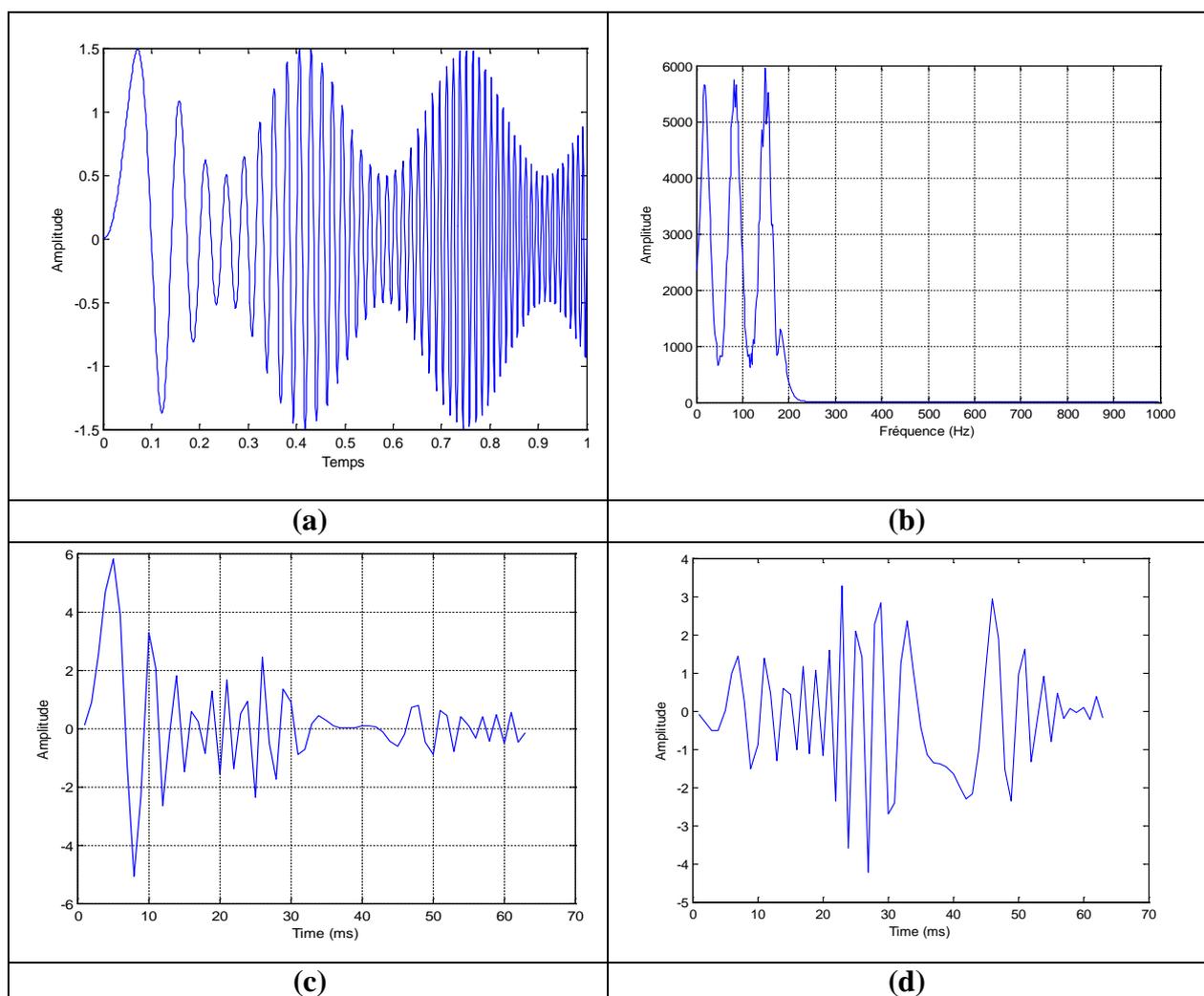


Fig. 2.3. Signal modulé en amplitude et en fréquence :

(a) Représentation temporelle, (b) Spectre de fréquence, (c) approximation (d) détail

Un signal modulé en amplitude et en fréquence représente généralement un défaut de denture des engrenages [15]. Le changement dans les conditions mécaniques d'un système d'engrenage peut produire des changements dans le signal vibratoire qu'il génère [13]. Ces changements peuvent prendre une forme d'augmentation d'amplitude ou de fréquence qui va conduire à une modulation d'amplitude ou de fréquence.

Le spectre de fréquence représente l'ensemble des pics qui montre une variation d'amplitude (modulation d'amplitude) avec une variation de fréquence qui n'est pas linéaire qui traduise la présence de l'effet de modulation de fréquence.

La représentation en transformée en paquet d'ondelette de ce signal montre la présence de l'effet de modulation en amplitude et en fréquence.

4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons testé la technique de la transformée en paquet d'ondelette à l'aide des signaux de test disponibles dans la littérature. Le prochain chapitre est réservé à l'application de la transformée en paquet d'ondelette sur des signaux vibratoires réels pour détecter la présence d'un défaut dans les systèmes d'engrenages.

Les oscillations d'approximation et détail obtenus par la transformée en paquet d'ondelette de l'ondelette de Haar de l'ordre 4 donne des représentations significatives des signaux de test.

Chapitre 3:

Diagnostic des défauts d'engrenage à base de la transformée en paquet d'ondelette

1. Introduction :

Le rôle des engrenages consiste à transmettre un mouvement ou une énergie mécanique entre deux arbres selon un rapport de vitesse. Le signal vibratoire délivré par ces engrenages peut être endommagé par les conditions d'opération (vitesse, charge, ...). Les engrenages sont très sollicités dans les systèmes de transmission de l'énergie mécanique. Le rôle des engrenages consiste à transmettre un mouvement ou une puissance entre deux arbres, selon un rapport de vitesse constant. Les matériaux utilisés varient en fonction des utilisations, mais on emploie plus couramment l'acier et la fonte, et les matériaux plastiques pour transmettre une faible puissance.

La surveillance et le diagnostic des défauts des systèmes d'engrenages sont indispensables pour prévenir un défaut sérieux dans les systèmes mécaniques. Les informations de la surveillance peuvent servir pour les planifications des activités de la maintenance.

L'analyse vibratoire à base des outils de traitement du signal est une approche effective pour l'analyse, la détection et le diagnostic des défauts dans les systèmes d'engrenages. Selon Li [16], 80% des pannes des systèmes de transmission des machines sont causées par la défaillance d'engrenage; donc la détection des défauts en stade précoce est très importante et même critique.

Dans ce chapitre, nous allons appliquer la méthode la transformée en paquet d'ondelette sur des signaux d'engrenage réels dans le but de la détection précoce des défauts d'un système d'engrenage placé sur un banc d'essai expérimental.

2. Notion général sur les engrenages :

L'engrenage est un des mécanismes élémentaires, utilisé pour transmettre le mouvement et la puissance selon un rapport de vitesses de rotation entre organes moteurs et récepteurs. Il est composé d'un ensemble de deux roues dentées engrenant l'une avec l'autre.

Les engrenages sont parmi les organes les plus sensibles de la chaîne cinématique et peuvent être soumis à un grand nombre d'avaries apparaissant lors du fonctionnement, et dont les causes sont multiples.



Fig. 3.1 . Système d'engrenage [17]

2.1. Typologie des engrenages :

Les engrenages sont classés en différentes catégories caractérisées par :

- La position relative des axes des arbres d'entrée et de sortie ;
- La forme extérieure des roues dentées ;
- Le type de denture

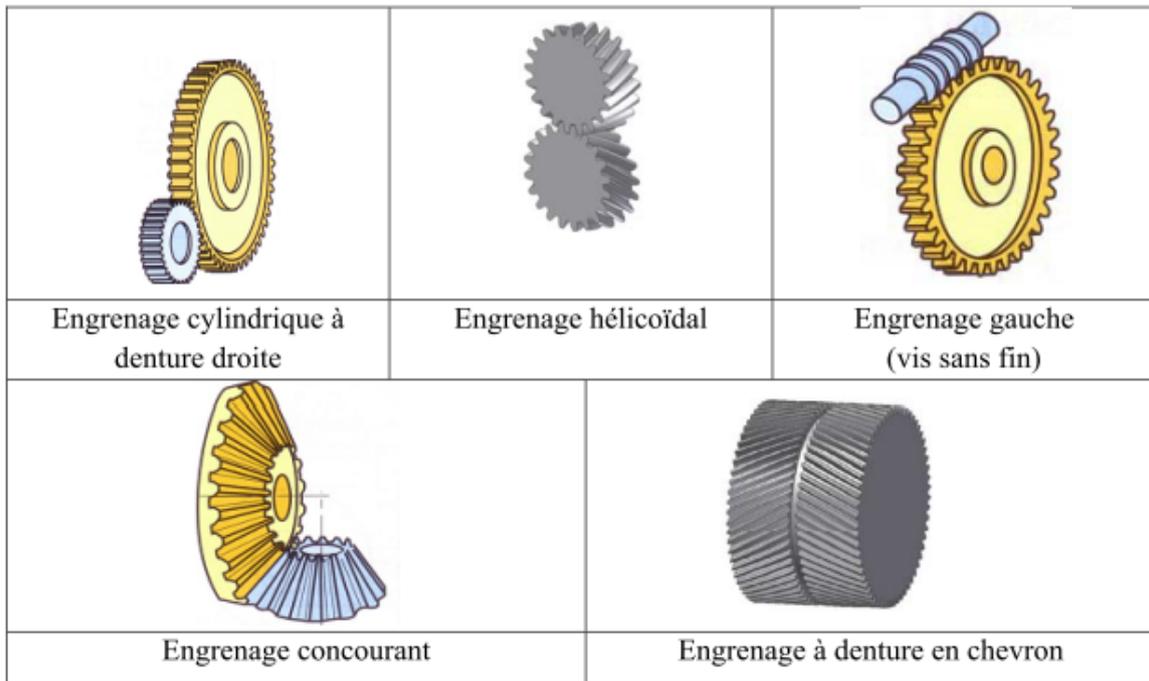


Fig. 3.2. Classification des engrenages [18]

2.2. Défauts des engrenages

On distingue principalement deux catégories de défauts :

A / Les défauts affectant toutes les dents usure, piquûres....

B / ceux localisés sur des dents particulières : fissuration, écaillage.

- Les défauts localisés sur des dents particulières conduisent rapidement à la rupture de celles-ci, contrairement aux défauts tels que l'usure normale.

Les engrenages peuvent avoir diverses utilités comme la réduction (ou la variation) de vitesse de rotation entre deux arbres avec une réduction (ou augmentation) du couple moteur. Mais les engrenages constituent la principale source de vibrations dans une boîte saine. Les sources d'excitation proviennent principalement de l'impact entre les dents des deux roues lorsqu'elles engrènent et de la variation de la rigidité de la denture due au déplacement du point de tangence entre les profils des deux dents.

2.2.1. Défauts de fabrication :

a) Défauts de taillage : La précision des engrenages taillés est particulièrement tributaire des erreurs d'exécution suivantes:

- Conception de la machine.
- État de la machine.
- Exactitude géométrique des outils (outils de forme).

- Conception des montages.

b) Erreur de pas: C'est le défaut de localisation angulaire d'une dent par rapport à sa position théorique. Deux grandeurs représentatives de la qualité de réalisation d'un engrenage sont associées à cette erreur. Ces grandeurs sont l'erreur de pas individuelle et l'erreur de pas cumulée.

2.2.2. Défauts de rectification :

Une opération de rectification conduite avec une avance ou une profondeur de passe excessive peut entraîner des criques par suite d'échauffement localisé important. Ces criques peuvent constituer des amorces de rupture, surtout si elles sont localisées vers le pied des dents et dans le sens longitudinal.

2.2.3. Défauts de montage :

- Défaut d'alignement ou de parallélisme.
- Les défauts d'excentricités.

2.2.4. Défauts de fonctionnement :

On distingue principalement deux catégories de défauts. Les défauts affectant toutes les dents et ceux localisés sur des dents particulières.

A) Défauts répartis sur toutes les dents :

L'usure : L'usure est un phénomène local caractérisé par un enlèvement de matière dû au glissement de deux surfaces l'une par rapport l'autre. Le développement de l'usure est lié à la charge mécanique à transmettre et à la vitesse de glissement, ainsi qu'à la présence plus ou moins grande d'éléments abrasifs dans le lubrifiant.

L'usure normale est inversement proportionnelle à la dureté superficielle de la denture et elle progresse lentement .L'usure anormale se produit lorsque le lubrifiant est souillé de particules abrasives (Fig.3.3) ou lorsque le lubrifiant est corrosif. Elle conduit à un mauvais fonctionnement de l'engrenage.



Fig. 3.3. Défauts de l'usure [19]

Les piqûres (Pitting) : Il s'agit des trous plus ou moins profonds (Fig.3.4) qui affectent toutes les dents. La piqûre est une avarie qui se produit surtout sur des engrenages en acier de construction relativement peu dur. Il est moins à craindre si la viscosité du lubrifiant est bonne. L'apparition des piqûres est associée aussi à un rapport épaisseur de film lubrifiant sur rugosité composite insuffisant pour éviter des contacts entre aspérités.



Fig. 3.4. Défauts de piqûre [20]

B) Défauts localisés sur certaines dents

Les défauts localisés sur des dents particulières conduisent rapidement à la rupture de celles-ci.

L'Écaillage : Il s'agit également de trous (Fig.3.5), mais ceux-ci sont beaucoup moins nombreux, plus profonds et plus étendus que ceux des piqûres. L'écaillage se trouve dans les engrenages cimentés, qui sont les plus répandus à l'heure actuelle car ils permettent de passer des couples importants avec des dimensions faibles.

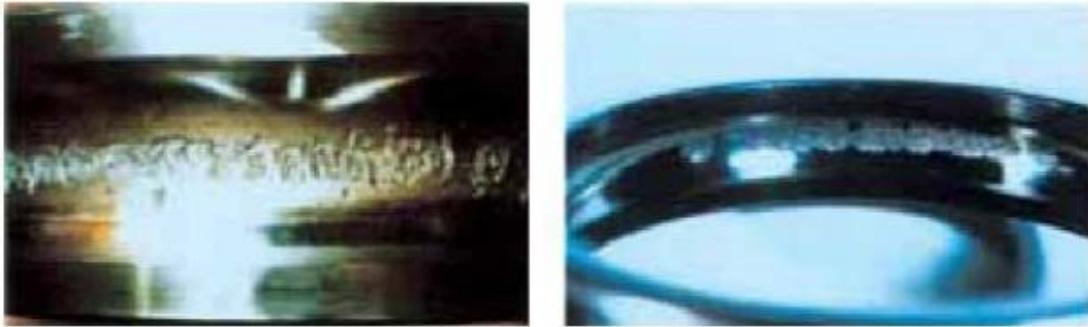


Fig. 3.5. Défauts de l'écaillage [19]

La fissuration : Elle progresse à chaque mise en charge, situé au pied de dent. Elle apparaît surtout sur des aciers fins durcis par traitement thermique qui sont sujets aux concentrations de contraintes. L'apparition de ces fissures est la conséquence d'une contrainte au pied de la dent qui dépasse la limite de fatigue du matériau. Ces fissures sont en général situées du côté de la dent sollicitée en traction.

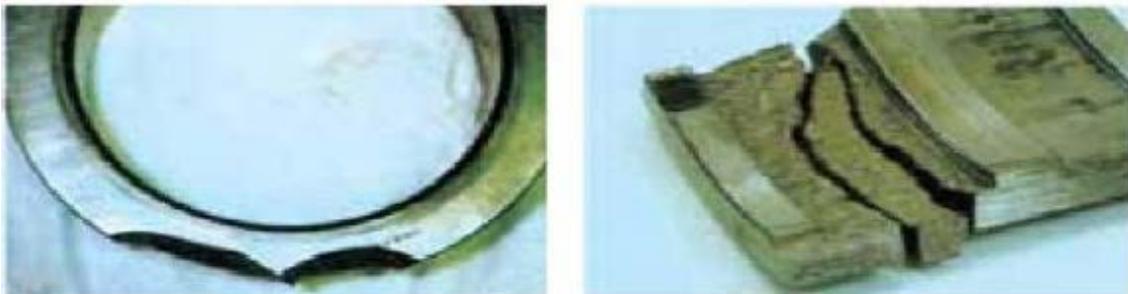


Fig. 3.6. Défauts de fissuration [19]

4. Techniques d'analyse des défauts :

Les techniques les plus célèbres pour la prévention des systèmes tournants se résument au contrôle de température (thermographie), le contrôle de débris des huiles, l'analyse acoustique et le contrôle du signal vibratoire (l'analyse vibratoire).

Le contrôle de température permet la détection de défaut mais il n'est pas capable de pronostiquer le défaut. Cette technique est utilisée principalement pour détecter les problèmes de lubrification et des systèmes de refroidissement.

L'analyse acoustique sert à la détection de bruits dans les fréquences audibles. L'analyse vibratoire offre la plus large couverture des techniques de détection. Il est admis pratiquement que tout changement dans les conditions mécaniques va causer un changement dans la signature vibratoire produite par la machine tournante.

Le tableau 1.1 résume les principaux avantages, limitations et champs d'applications de ces techniques d'analyse.

	Principaux avantages	Principales limitations	Champ d'applications privilégié
Analyse vibratoire	<ul style="list-style-type: none"> - Détection de défauts à un stade précoce. - Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi. - Autorise une surveillance continue. - Permet de surveiller l'équipement à distance (télémaintenance) 	<ul style="list-style-type: none"> - Spectres parfois difficiles à interpréter - Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses 	Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure
Analyse d'huiles	<ul style="list-style-type: none"> - Détection d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou un échauffement. - Possibilité de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne permet pas de localiser précisément le défaut. - Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon 	Contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de lubrification, analyse des éléments d'usure.
Thermographie IR	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation. - Interprétation souvent immédiate des résultats. 	<ul style="list-style-type: none"> - Détection de défauts à un stade moins précoce que l'analyse vibratoire. - Contrôle limité à ce que "voit" la caméra (échauffements de surface). - Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi. 	Détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque de lubrification en particulier).
Analyse acoustique	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de détecter l'apparition de défauts audibles. - Autorise une surveillance continue. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité au bruit ambiant. - Diagnostic souvent difficile à réaliser. - Problèmes de répétition des mesures. 	Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire

Tab. 3.1. Techniques d'analyse de l'état d'une machine tournante [21].

Pour les machines tournantes, un indicateur de type vibratoire permet de détecter la plupart des défauts (Fig. 3.7).

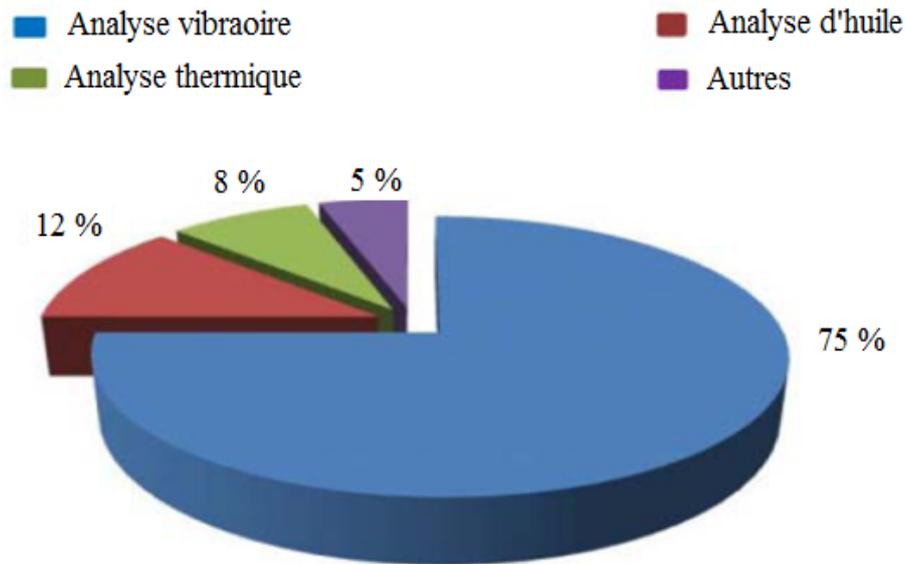


Fig. 3.7. Utilisation des techniques d'analyse.

D'après la Fig.3.7, l'analyse vibratoire est la technique la plus utilisée. Cette importance est revenue à l'efficacité de détecter la plupart des défauts.

4.1. Analyse vibratoire :

Toutes les machines possédant des composants en mouvement génèrent un certain niveau de vibration. Ainsi, une machine neuve en excellent état de fonctionnement produit très peu de vibrations. Aujourd'hui, l'emploi des technologies intégrant les méthodes avancées du signal occupe une place privilégiée pour faire un diagnostic d'un équipement mécanique. Ces caractéristiques font de la surveillance par analyse vibratoire un outil indispensable pour une maintenance moderne, puisqu'elle permet d'améliorer la disponibilité et la sécurité, par détection précoce et le suivi de la dégradation des éléments critiques, et ainsi de localiser l'organe défectueux sans démontage de la machine. On utilise à cet effet des paramètres calculés :

- soit dans le domaine temporel,
- soit dans le domaine fréquentiel,
- soit dans les deux domaines à la fois (temps –fréquence).

Dans notre cas, la technique de la transformée en paquet d'ondelette est basée sur la transformée en ondelette. Cette dernière utilise le domaine temps –fréquence.

5. Détection précoce de défauts d'un système d'engrenages par la transformée en paquets d'ondelettes :

La détection précoce de défauts dans les systèmes mécaniques, est d'une grande importance pour les opérateurs, a attiré l'attention de beaucoup de chercheurs ces dernières années. Elle vise la planification de l'arrêt et la réparation de ces systèmes au lieu de dégâts catastrophiques causée par des défauts inattendus. On trouve plusieurs techniques dans la littérature pour la détection précoce de défauts basées sur l'analyse vibratoire. L'analyse vibratoire fait appel aux outils de traitement de signal dans les domaines temporel, fréquentiel, et temps-fréquence. Chaque technique possède des avantages et des limitations. Le principe fondamental de l'analyse vibratoire repose sur le fait qu'un changement dans les conditions mécaniques du système peut induire un changement dans les vibrations produites par ce système. Dans les systèmes simples, ce changement peut prendre la forme d'augmentation d'amplitude du signal vibratoire. Pour les systèmes plus complexes, le changement dans le signal vibratoire dû à la détérioration d'un organe de la machine sera moins considérable; et pour identifier le défaut, des techniques plus élaborées sont nécessaire.

Les engrenages sont détériorés de plusieurs manières, et à l'exception de l'augmentation dans le bruit et le niveau de vibrations, il n'y a pas souvent un indicateur pertinent jusqu'à l'apparition du défaut. Le signal vibratoire produit par un système d'engrenage à deux roues dentées est un signal multi composant et non stationnaire. Puisque les informations des défauts sont noyées dans le bruit, une technique de traitement de signal adéquate est alors nécessaire pour la détection précoce des défauts.

Dans cette partie, nous allons appliquer la méthode la transformée en paquet d'ondelette sur des signaux d'engrenage réels dans le but de la détection précoce des défauts d'un système d'engrenage placé sur un banc d'essai expérimental.

5.1. Description du système étudié

Les signaux vibratoires sur lesquels nous avons effectués les tests de la validité et de l'efficacité de la méthode proposée proviennent d'un réducteur de CETIM (Centre d'Études Techniques des Industries Mécanique, 52 av. Felix Louat, 60300 Senlis, France) [22], [23], [24].

Le réducteur est composé d'un pignon de 20 dents et d'une roue de 21 dents. Ce système fonctionne 24h/24h sous des conditions fixes. La vitesse du moteur d'entraînement est de 1000 tours/minute; ce qui correspond à une fréquence de rotation (f_r) de l'ordre de 16.67 Hz. Le signal d'engrènement est périodique, sa fréquence est égale à la fréquence de

rotation de l'une des deux roues multipliée par le nombre de dents de cette roue selon l'équation suivante :

$$f_e = Z_1 \cdot f_1 = Z_2 \cdot f_2 \quad (3.1)$$

Avec : f_1 et f_2 : La fréquence de rotation de la roue 1 et 2 respectivement.

Z_1 et Z_2 : Le nombre de dents des roues 1 et 2 respectivement.

D'où la fréquence d'engrènement (f_e) qui est de l'ordre de 333.33 Hz pour le pignon et 350 Hz pour la roue.

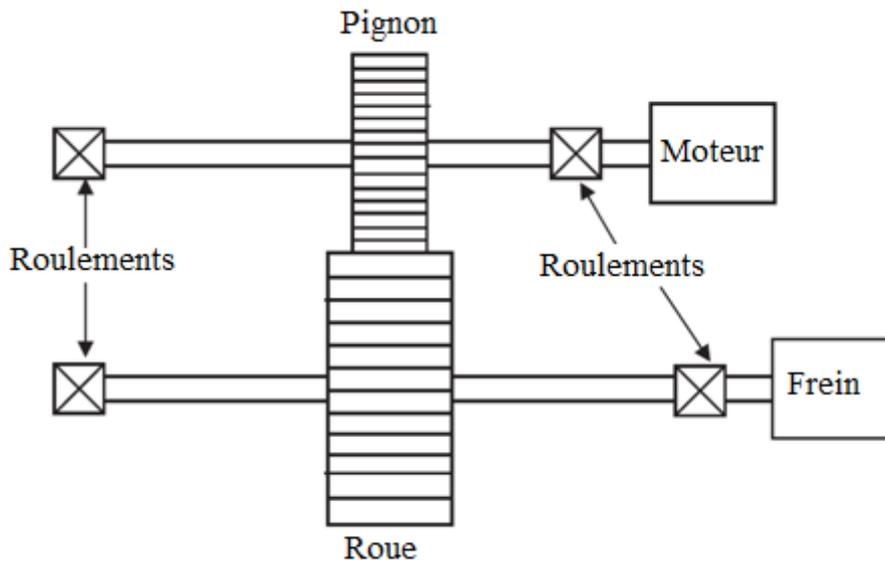


Fig. 3.8. Schéma représentatif du réducteur de CETIM [25].

Les caractéristiques techniques du banc d'essai de CETIM sont données au tab.3.2.

Paramètre	Pignon	Roue
Vitesse (trs/min)	1000	952
Nombre de dents	20	21
Largueur (m)	0.015	0.03
Diamètre (m)	0.092	0.110
Module (m)	0.01	0.01
Angle de pression (°)	20	20
Coefficient de creux	1.4	1.4
Coefficient de saillie	1.0	1.0
Masse (N)	36	80

Tab. 3.2. Caractéristiques du banc d'essai de CETIM [25], [26], [27].

L'une des dents d'une roue du système d'engrenages sous essai a été détériorée au cours de l'expérimentation. Les enregistrements sont effectués chaque jour pendant 12 jours. Après chaque acquisition des signaux vibratoires, le banc est arrêté pour expertiser l'état des dentures des roues.

Le rapport d'expertise est donné au tab.3.3.

Jour	Observations
1	Premier jour d'acquisition, pas d'anomalie
2	Pas d'anomalie
3	// //
4	// //
5	// //
6	Ecaillage dent 1/2
7	Pas d'évolution
8	Dent 1/2 pas d'évolution, dent 15/16 début d'écaillage
9	Evolution de l'écaillage dent 15/16
10	// //
11	// //
12	Ecaillage sur toute la largeur de dent 15/16

Tab. 3. 3. Rapport d'expertise [26], [27].

Un signal vibratoire issu du banc d'essai comporte 60160 échantillons, avec une fréquence d'échantillonnage de 20 kHz ; soit une durée de 3.008s.

La fréquence de rotation (f_r) de l'ordre de 16.67 Hz correspond à une période de 0.06s. Donc, le nombre de périodes de rotation est égal à 50.13 périodes.

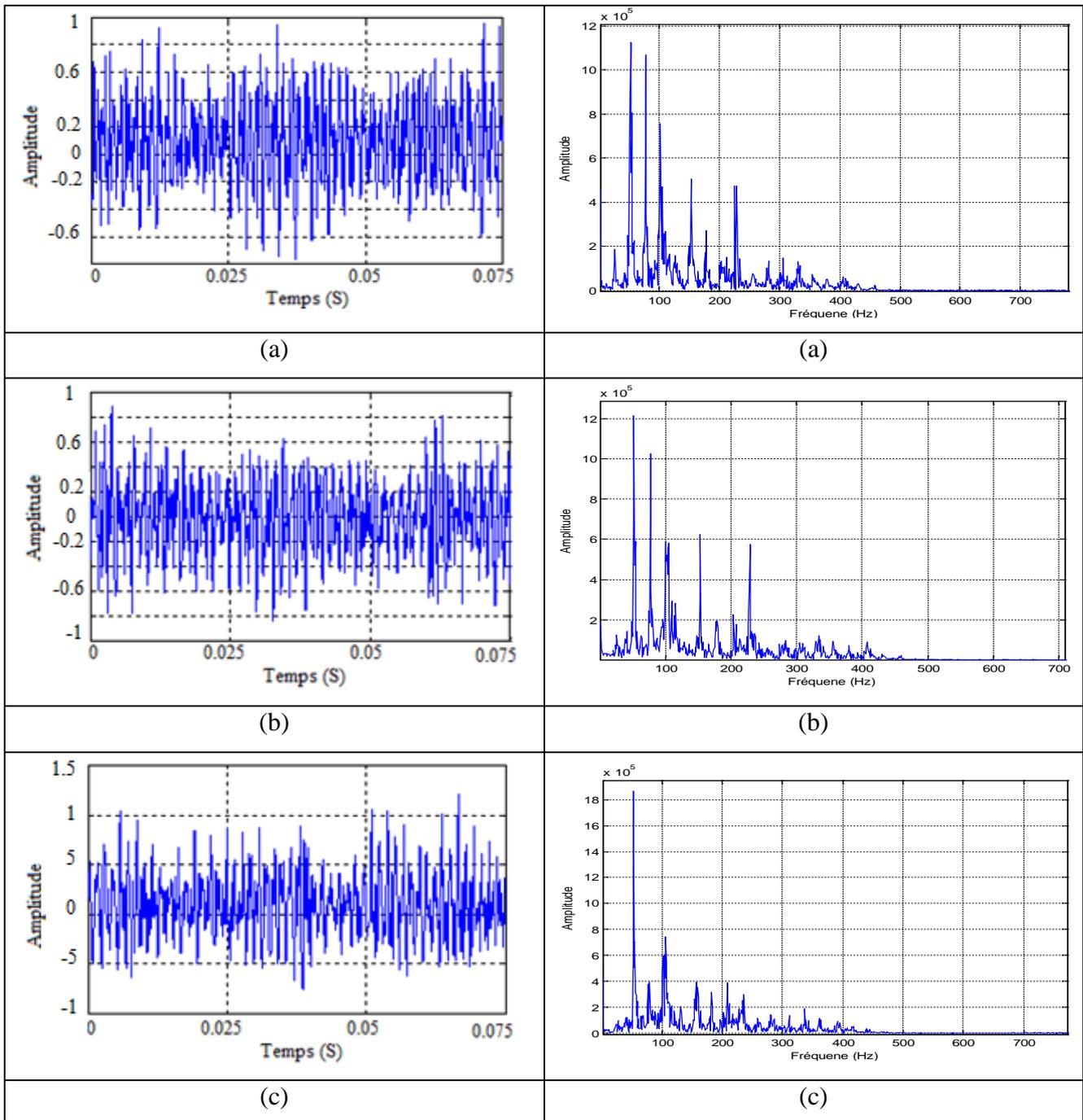
5.2. Résultats et discussion

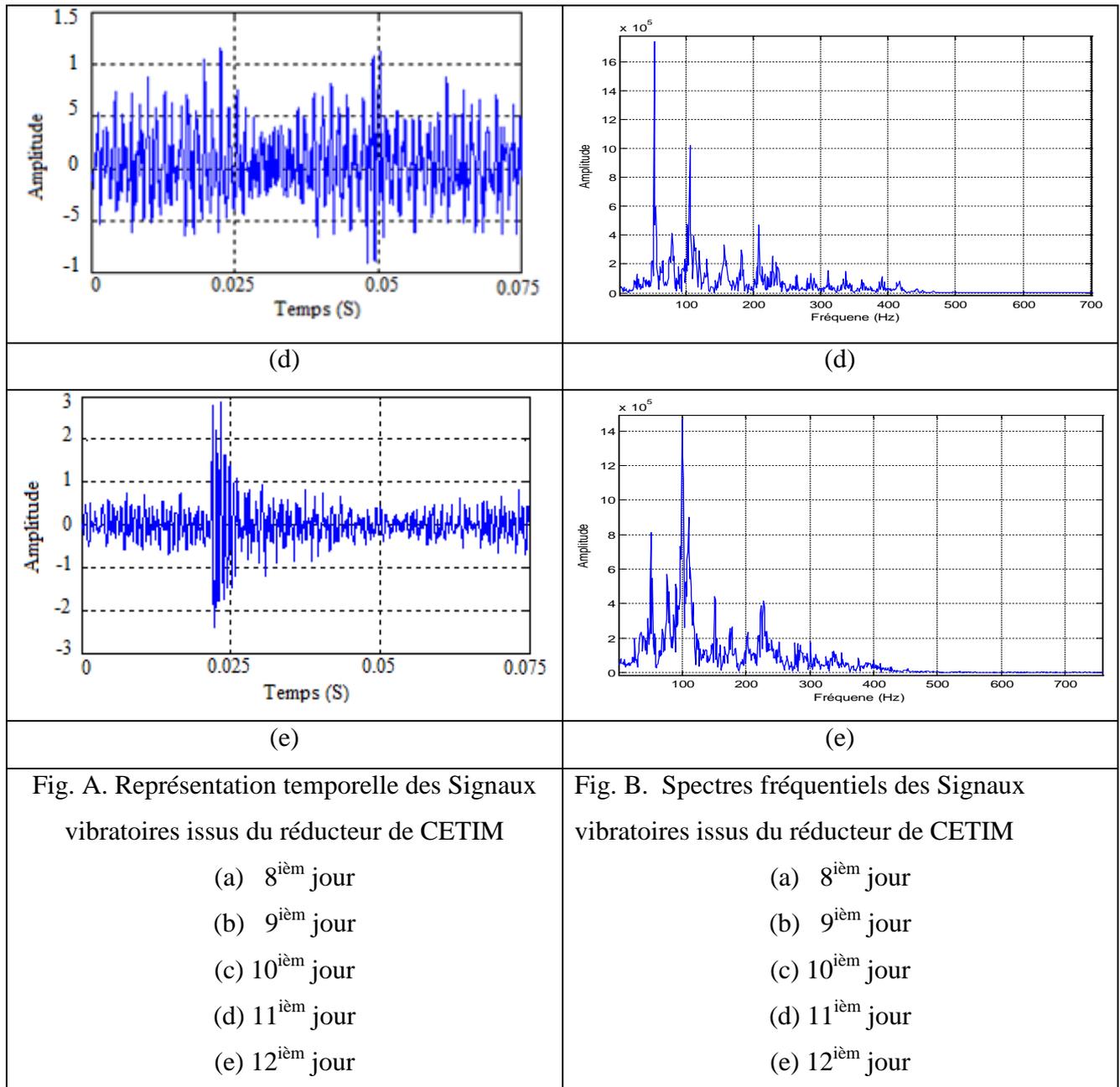
Vu le grand nombre de données (60160 échantillons), il est difficile de les traiter dans leur totalité ; donc, on doit choisir un nombre permettant de ne pas perdre beaucoup d'informations. Pour cela, on doit au moins couvrir une période.

On a $f_r = 16.67$ Hz et la fréquence d'échantillonnage égale à 20 kHz. Pour calculer le nombre d'échantillons couvrant une période, on divise la période de rotation T sur la période d'échantillonnage. Le nombre d'échantillons obtenu sera 1200 échantillons. On choisit donc un nombre de 1500 échantillons. Donc la durée de 1500 échantillons est égale à 0.075 s.

5.2.1. Représentation temporelle

Les représentations temporelles des signaux vibratoires issus du réducteur de CETIM sont données sur la Fig. A. Nous avons donné la représentation temporelle des jours : 8, 9, 10, 11 et 12 ; c'est à dire deux jours avant la détection de défaut et deux jours après, vu qu'on est arrivé à détecter le défaut au 10^{em} jour.





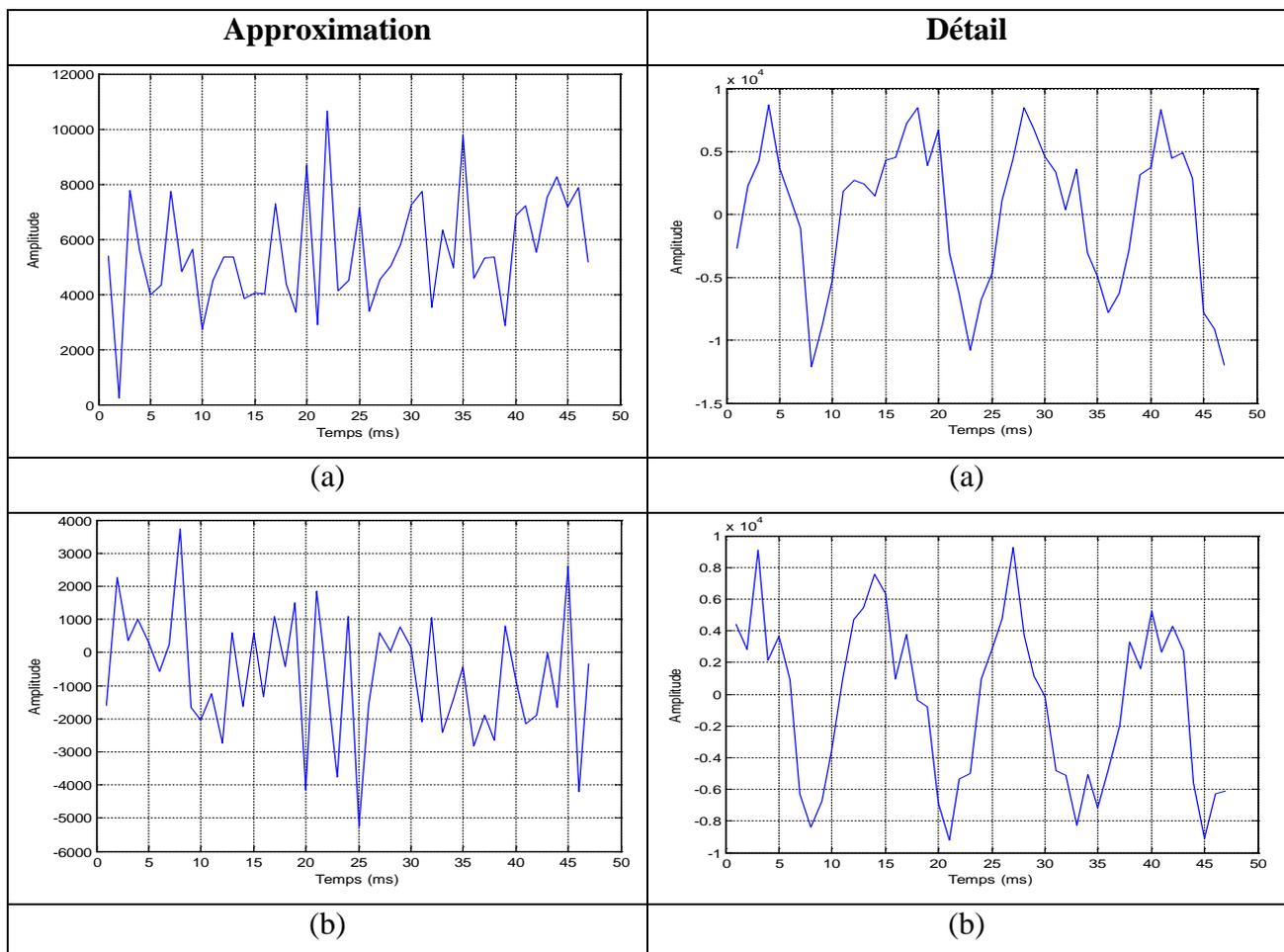
Tab. 3.4. Représentation temporelle et fréquentielle des signaux vibratoire issus du réducteur du CETIM

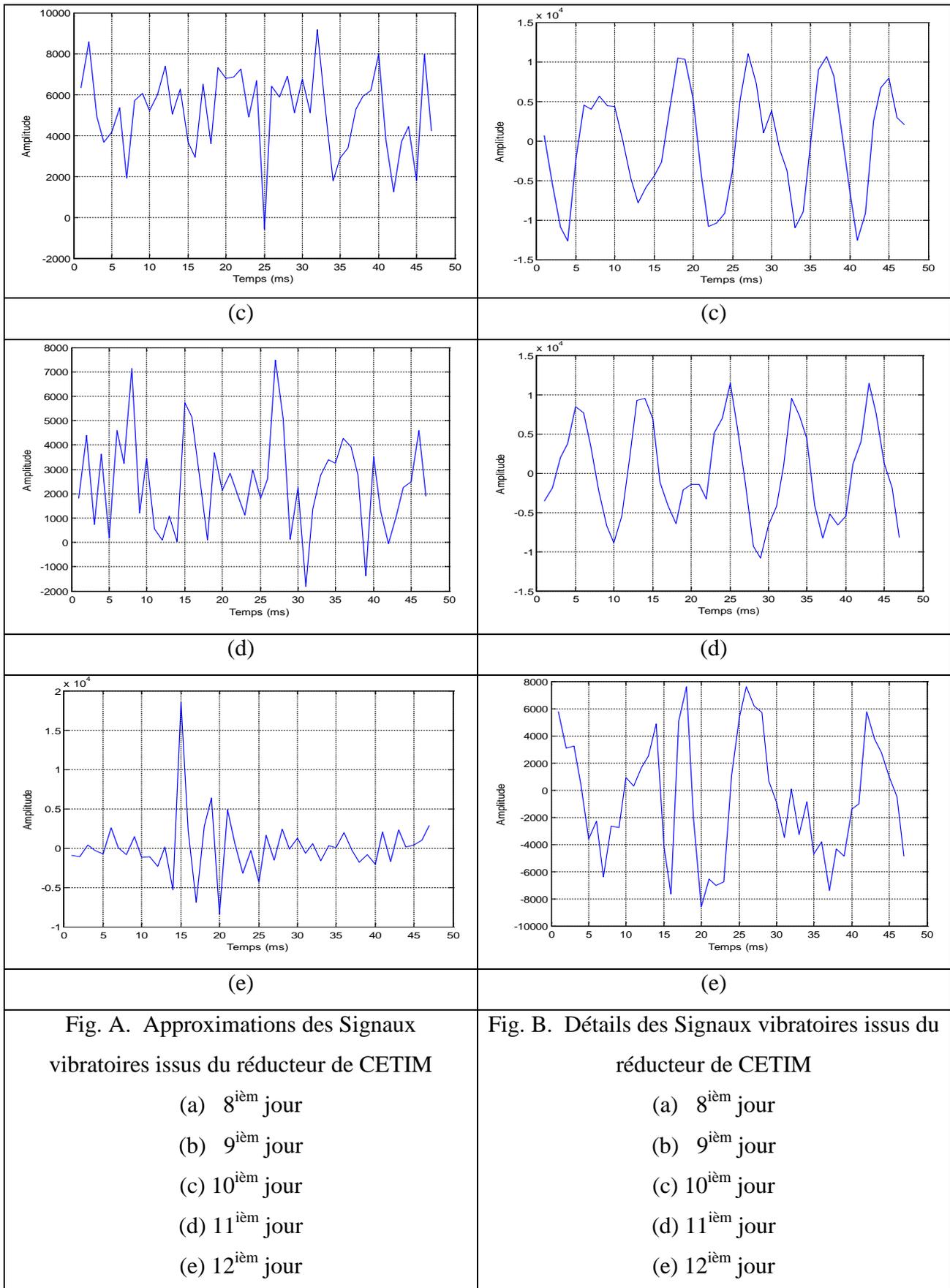
La représentation temporelle du signal vibratoire d'engrènement pendant les onze premiers jours ne donne aucun indice supplémentaire caractérisant l'apparition d'un défaut. D'après la Fig. A , on constate que la représentation temporelle des signaux observés chaque jour présente des oscillations qui sont causées par l'engrènement et une modulation de longue durée correspondant à la période des deux roues (pignon de 20 dents et roue de 21 dents). Le signal vibratoire conserve cette forme jusqu'au 11^{ième} jour. Par contre le 12^{ième} jour, pendant lequel le défaut est supposé apparaître où l'écaillage a été étalé sur toute la largeur de la dent

15/16 selon le rapport d'expertise (Tab.3.2), présente une représentation différente. Nous remarquons une augmentation très élevée de l'amplitude du signal autour des modulations par rapport aux oscillations entre ces dernières. Les spectres de fréquence correspondants sont représentés sur la Fig. B. Les raies latérales sont très importantes au 12^{ème} jour par rapport aux autres jours et cette augmentation est due à la présence d'un défaut dû à la détérioration d'une dent. Donc la représentation temporelle et fréquentielle permettent de diagnostiquer un défaut au 12^{ème} jour.

5.2.2. Représentation parla transformée en paquet d'ondelette

La transformée en paquets d'ondelettes dyadiques est basée sur la transformée en ondelettes précédente. La première étape de décomposition est la même. Cependant, les signaux de détail et d'approximation sont à nouveau décomposés . Toutes les sous bandes fréquentielles couvrent des domaines de largeurs identiques 8. Dans le cas de la détection des défauts de roulements, cette technique permet d'obtenir la même finesse d'analyse quelles que soient les fréquences investiguées. Nous avons utilisée l'ondelette de Haar et l'ordre des approximations et des détails c'est le niveau 5.





Tab. 3.4. Approximation et détail des signaux vibratoires issus du réducteur de CETIM

Après l'extraction du signal vibratoire du système d'engrenage, nous avons appliqué le WPT pour décomposer le signal vibratoire en deux composantes. La composante des bases fréquences qui représente les approximations (Fig. A) et la composante des hautes fréquences qui représente les détails (Fig .B) .Cette opération est obtenue par l'utilisation de deux filtres: un filtre passe-bas (H_k) et un filtre passe-haut (G_k).

Selon la Fig. B, le nombre de pics du composant détail est 4 pics avec un changement relatif de l'amplitude des pics. Ce changement est dû aux plusieurs phénomènes mécaniques (qualité du lubrifiant par exemple). Au 10^{ème} jour, nous remarquons une augmentation de nombre de pics (le nombre est 5 pics). Ce changement est dû à plusieurs phénomènes, comme le niveau et la qualité du lubrifiant à titre d'exemple. Ces changements sont induits, selon le rapport d'expertise, par l'écaillage de la dent 1/2 au 6^{ème} jour, début d'écaillage de la dent 15/16 au 8^{ème} jour et à l'évolution de l'écaillage de la dent 15/16 (Tab.3.3). De ce fait, le WPT à bien réussi à déceler la présence précoce du défaut d'engrenage, au 10^{ème} jour avant l'écaillage visible (12^{ème} jour).

6. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons testé la performance de la transformée en paquet ondelette sur des signaux réels d'un réducteur d'engrenages de CETIM. Après l'extraction du signal vibratoire du système d'engrenage, nous avons appliqué l'approche de WPT pour décomposer le signal vibratoire en deux composantes (approximations et détails). Les résultats d'approximation et détail obtenus par la transformée en paquet d'ondelette de l'ondelette de Haar de l'ordre 5 obtenus ont mis en évidence l'efficacité de cette approche pour la détection précoce de la présence du défaut d'engrenage. Nous avons détecté la présence des défauts en stade précoce (deux jours avant l'apparition réelle du défaut).

Conclusion Générale

La détection précoce d'un défaut constitue l'une des étapes les plus importantes. De nos jours, beaucoup de techniques d'analyses vibratoires des équipements industriels ont été proposées par les chercheurs. Certaines techniques peuvent être plus convenables que d'autres. Parmi ces techniques on trouve la transformée de Fourier à fenêtre glissante, la transformée en paquet d'ondelettes ...

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la détection des défauts d'engrenage par analyse vibratoire.

Dans ce travail, premièrement, nous avons présenté quelques notions et définitions de base utilisées dans l'analyse des signaux vibratoires par la transformée en paquet d'ondelette.

Deuxièmement, nous avons testé la transformée en paquet d'ondelettes par quelques signaux de types vibratoires et nous avons présenté ces signaux en domaine : temporelle, fréquentielle et en temps fréquence pour évaluer les avantages et les inconvénients de chacune d'entre eux pour faire un choix pour testé les signaux réels.

Dans un troisième temps, nous avons appliqué la technique de la transformée en paquet d'ondelette sur des signaux d'engrenage réels dans le but de la détection des défauts d'un système d'engrenage placé sur un banc d'essai expérimental.

Enfin, nous pouvons dire qu'en plus de sa simple implémentation, la technique de la transformée en paquet d'ondelette présente un outil très efficace et précieux dans le cadre du diagnostic précoce des défauts de réducteurs à engrenages dans les machines tournantes. Les résultats obtenus ont manifesté la bonne performance et l'efficacité de l'approche dans le cadre de la détection précoce de la présence d'un défaut d'engrenage.

Dans ce travail, nous avons détecté la présence du défaut d'une manière précoce en 10^{ième} jour. En perspective, dans les prochains travaux nous essayons d'avancer cette détection aux jours avancés (c.-à-d. avant le 10^{ième} jour) par l'application d'autres approches.

Références Bibliographiques

- [1] I. Daubechies, "The wavelet Transform, Time-frequency Localisation and Analysis", IEEE, transactions on information theory. Vol. 36, pp. 961-1004, 1990.
- [2] Y. Larsen, A. Hanssen, "Wavelet-polyspectra: analysis of non-stationary and non-Gaussian/non-linear signals", Proceedings of IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing, pp. 14–16, 2000.
- [3] T. Ishak « Extraction d'indiction robustes pour le diagnostic des défauts mécanique : comparaison de l'EMD et des ondelettes (WT), mémoire de magister, université Ferhat Abbas Sétif.
- [4] F. Truchet et ondelette pour le signal numérique .Editions Hetmes, 1998.
- [5] Z.E. Hadj Slimane « Cours et TP de traitement du signal avancée », Département de génie électrique et électronique, Faculté de technologie, Université de Tlemcen.
- [6] L. Nacib « Diagnostic des défauts dans les machines tournante par l'analyse vibratoire» , thèse doctorat ,université badji mokhtar,annaba ,2015.
- [7] Valérie PERRIER : Transformée en ondelettes continue : Théorie, applications à l'imagerie médicale]. Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005.
- [8] Z. Ihassan « Les paquets d'ondelettes » , exposé, département mathématique, faculté des science d'Agadir,2014.
- [9] M. Ayad, M.Rezki, M.Benziane, K.Saoudi, A.Arabi, "Fault diagnosis of rotating machines using Wavelet Packets Transform" ,"proceeding of the international conference on Recent advaces in electrical systems,Tunisia,2018.
- [10] François.Malgouyres, «Représentation des images et ondelette »
<http://www.zeus.math.univ-paris.fr/~malgouymalgouy@math.univ-paris13.fr>. Date de consultation : 20/08/2019.
- [11] M. Hafida, « Analyse non stationnaire des signaux vibratoires dans la surveillance des machines et la prévention des défaillances », thèse de Doctorat, Institut d'Optique et Mécanique de Précision, Université de Sétif, 2013.

- [12] P. D. McFadden, “Examination of a technique for the early detection of failure in gears by signal processing of the time domain average of the meshing vibration”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1 (2), pp.173- 183, 1987.
- [13] A. Djebala, “Application de la Transformation par Ondelette à l’étude et l’analyse vibratoire des systèmes mécanique”, thèse de Doctorat en Construction Mécanique, Université Badji Mokhtar Annaba, 2008.
- [14] A. Boulenger et C. Pachaud, *Surveillance des machines par analyse des vibrations*, Aide-mémoire, Dunod, Paris, 2009
- [15] I. Khelf, «Diagnostic Des Machines Tournantes Par Les Techniques De L’intelligence Artificielle», Thèse De Doctorat, Université Badj Mokhtar – Annaba (2014)
- [16] Z. Li, X.Yan, C. Yuan, Z. Peng, L. Li, “Virtual prototype and experimental research on gear multi-fault diagnosis using wavelet-autoregressive model and principal component analysis method”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25, pp. 2589–2607, 2011.
- [17] M .T. Nabti, « Etude de l’évolution des indicateurs spectraux et cepstraux dans la détection des défauts mécaniques ».Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas Sétif (2011).
- [18] I. Khelf, «Diagnostic Des Machines Tournantes Par Les Techniques De L’intelligence Artificielle», Thèse De Doctorat, Université Badj Mokhtar – Annaba (2014).
- [19] Z. Li, X.Yan, C. Yuan, Z. Peng, L. Li, “Virtual prototype and experimental research on gear multi-fault diagnosis using wavelet-autoregressive model and principal component analysis method”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25, pp. 2589–2607, 2011.
- [20] M. L. Zani, «Mesures mécaniques: surveillance des machines tournantes », guide d’achat, *Mesures N° 757*, pp.77-84, 2003.
- [21]Omar DJEBILI ; «Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement». Thèse de doctorat, Université De Reims Champagne Ardenne (2013)
- [22] J. Antonia, Randall, R.B., “The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 20, pp. 308–331, 2006.

- [23] A. Parey, Ram Bilas Pachori, “Variable cosine windowing of intrinsic mode functions: Application to gear fault diagnosis”, *Measurement*, Vol. 45, pp. 415-426, 2012.
- [24] M. Ayad, Dj. Chikouche, N. Boukezzoula, M. Rezki, “Search of a robust defect signature in gear systems across adaptive Morlet wavelet of vibration signals”, *IET Signal Processing*, Vol. 8 (Issue N° 9), p. 918 –926, 2014.
- [25] Haloui, N., Chikouche, D., Benidir, M., “Application des méthodes d’analyse spectrale paramétrique à la détection des défauts d’engrenage dans les machines tournantes”, *IEEE Canadian Conference on electrical & computer engineering*, 2002, pp. 190–194.
- [26] Mohamed EL-Badaoui, “Contribution au Diagnostic Vibratoire des Réducteurs Complexes à Engrenages par l’Analyse Cepstrale”, thèse de Doctorat, université de Jean-Monnet- France, pp. 95-97, 1999.
- [27] Dj. Chikouche, A. Felkaoui, N. Haloui, “Diagnostic précoce d’un réducteur a engrenage par analyse des signaux vibratoires a l’aide du cepstre synchrone”, *Proceeding International Conference On Industrial Engineering and Manufacturing ICIEM’10*, May, 9-10, Batna, Alegria, pp. 219-224, 2010.

ملخص

حاليا الإشراف على الآلات الدوارة مهم جدا. يجب اكتشاف العيوب العديد من المشكلات، لأنه إذا لم يتم اكتشاف عيوب التروس مبكراً، فإن حالة الماكينة ستستمر في التدهور، وقد تسبب خسائر اقتصادية فادحة أو حتى كارثة بشرية. وتستخدم العديد من التقنيات لهذا الغرض. من بين هذه الطرق، نجد التحليل الاهتزازي. أساس التحليل الاهتزازي هو الحصول على توقيع العيوب في خصائص الإشارة الاهتزازية. تعقيد الإشارة الاهتزازية في هذه الخصائص غير الخطية غير الثابتة، وصاحبة للغاية. الهدف هو اقتراح طريقة للتغلب على هذه الصعوبات. في هذا العمل، نستخدم طريقة تحليل اهتزاز حزم الموجات كوسيلة للبحث عن توقيع عيوب نظام التروس.

الكلمات المفتاحية: تحليل الاهتزاز. تتحول إلى حزم الموجات. إشارات الاهتزاز. العيوب والعتاد

Résumé

Actuellement, la surveillance des machines tournantes est très capitale. La détection des défauts évite beaucoup de problèmes. Parce que si les défauts d'engrenage ne sont pas détectés en stade précoce, l'états de la machine continuera à se dégrader, et peut être causer de lourdes pertes économiques ou même une catastrophe humaine. De nombreuses techniques sont utilisées à cette fin. Parmi ces méthodes, nous trouvons l'analyse vibratoire. La base de l'analyse vibratoire est d'obtenir la signature des défauts dans les caractéristiques du signal vibratoire. La complexité du signal vibratoire est de dans ces caractéristiques non-linéaire non stationnaire, et très bruité. L'objectif est de proposer une méthode pour surmonter ces difficultés. Dans ce travail, nous utilisons la méthode de l'analyse vibratoire par paquets d'ondelette comme un moyen pour chercher les signatures des défauts des systèmes d'engrenage.

Mots clés : Analyse de vibration; transformé en paquets d'ondelettes; signaux vibratoires, défauts d'engrenage.

Abstract

Currently, the supervision of rotating machinery is very important. The detection of faults avoids many problems. Because if gear defects are not detected early, the machine's condition will continue to degrade, and may cause severe economic losses or even a human catastrophe. Many techniques are used for this purpose. Among these methods, we find the vibratory analysis. The basis of the vibratory analysis is to obtain the signature of the defects in the characteristics of the vibratory signal. The complexity of the vibratory signal is in these non-linear non-stationary characteristics, and very noisy. The objective is to propose an approach for the detection of this signature. This approach is based on Wavelet Packets Transform (WPT).

Keywords: Vibration analysis; transformed into wavelet packets; vibratory signals, gear defects.