

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Akli M'hand Oulhadj – Bouira



Faculté des sciences et des sciences appliquées

Département de Génie Electrique

Mémoire de Master

Filière : Génie électrique

Option : Technologies des Télécommunications

Réalisé Par :

- BACHOUCHE Hassina

- AZZI Ouahiba

Thème :

***Analyse des signaux vibratoires par la transformée
en ondelette***

Date de soutenance : 24/09/2017

Devant le jury composé de :

Mr. BENZIANE Mourad	MAA à l'université de Bouira	Président
Mr. AYAD Mouloud	MCA à l'université de Bouira	Rapporteur
Mr. CHALABI Izzeddine	MCB à l'université de Bouira	Examinateur
Mr. DIB Riad	MAA à l'université de Bouira	Examinateur



Remerciements

Nous rendons grâce au Dieu le tout puissant de nous avoir donné la volonté et la patience pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons en premier lieu, à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur Mr. AYAD Mouloud qui a bien voulu nous encadrer pour l'élaboration et le suivi de notre mémoire de master.

Nous remercions également messieurs les membres du jury pour la caution qu'ils ont bien voulu apporter à ce travail. Nous adressons nos remerciements et gratitude aux;

Mr. BENZIANE Mourad d'être président du jury de ce mémoire.

Mr. CHALABI Izzeddine et Mr. DIB Riad d'être examinateurs de ce travail.

Nous tenons à remercier nos familles AZZI et BACHOUCHE de nous avoir soutenu, nous ne serons jamais assez reconnaissants envers nos parents qui ont toujours tout mis en œuvre pour qu'on s'épanouisse dans tous ce qu'on entreprend



Résumé :

L'analyse du signal est considérée comme l'un des principaux moyens utilisés. Les informations importantes contenues dans les signaux peuvent être extraites. On peut utiliser des transformées temps-fréquence, tels que la distribution de Wigner-Ville et la transformée de Fourier à courte durée (Short Time Fourier Transform STFT) pour analyser les signaux vibratoires. Cependant, ces techniques fournissent une résolution constante pour toutes les fréquences due à la même fenêtre utilisée pour l'analyse de la totalité du signal. Afin de dépasser ces inconvénients, la transformée en ondelette a été introduite. L'objectif de ce travail est d'étudier la Transformée en Ondelette pour l'analyse des signaux vibratoires.

Mots clés : TO, FFT, STFT, signaux vibratoires, les engrenages

SOMMAIRE

Remerciements	I
Résumé	II
Sommaire	III
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	V
Liste des abréviations	VII

Introduction générale	01
------------------------------------	-----------

Chapitre 1: Notions générales sur la transformée en Ondelette.

1. Introduction	02
2. Historique	02
3. Transformée de Fourier	02
3.1 Transformée de Fourier Fenêtrée	03
4. Théorie des Ondelette	04
4.1 Définition d'une ondelette	04
4.2 Transformée en ondelette	05
4.2.1 Ondelette Mère	06
4.2.2 Transformée en ondelette continue (TOC)	06
4.2.3 Transformée en ondelette discrète (TOD)	08
4.2.4 Familles d'ondelettes	09
4.2.5 Application des ondelettes dans la détection des défauts	09
4.2.6 Choix de l'ondelette	10
4.2.6.1 Ondelette de Daubechies	10
4.2.6.2 Choix de Symlets	11
5. Avantages et inconvénients de la transformée en ondelettes	12
6. Conclusion	12

Chapitre 2 : Validation de la transformée en ondelette par des signaux de test

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	17
3.2.2. Effets de modulation de fréquence	18
3.2. 3. Modulation d'amplitude et de fréquence	20
4. Conclusion	22

**Chapitre 3 : Validation de la transformée en ondelette par des signaux
vibratoires réels**

1. Introduction -----	23
2. Défaut d'engrenage -----	23
2.1 Technique d'analyse -----	23
2.2 Principale sources des vibrations -----	24
3. Description du système étudié -----	25
4. Vibration mécanique -----	27
4.1 Définition d'une vibration -----	27
4.2 Caractéristiques d'une vibration -----	27
4.3 Objectifs d'analyse vibratoire -----	28
5. Résultat et discussion -----	29
5.1 Représentation temporelle et fréquentielle -----	29
5.2 Les scalogrammes obtenus par l'application de la transformée en ondelette de Symlet --	32
5.3 Les scalogrammes obtenus par l'application de la transformée en ondelette de Daubechies -----	35
6. Comparaison entre les différentes méthodes exposées -----	39
7. Conclusion -----	39
Conclusion générale -----	40
Références biobibliographiques -----	41

Liste des figures :

Figure 1.1 : Représentation temporelle vers ondelettes -----	5
Figure 1.2 : Principe de la Transformée en ondelette Continue -----	7
Figure 1.3 : Les ondelettes de symlets -----	11
Figure 1.4 : Les ondelettes de Daubechies -----	11
Figure 2.1 : Signal sinusoïdal-----	15
Figure 2.2 : Signal modulé en amplitude-----	18
Figure 2.3 : Signal modulé en fréquence -----	19
Figure 2.4 : Signal modulé en amplitude et en fréquence-----	21
Figure 3.1 : Systèmes d’engrènement-----	23
Figure 3.2 : Différentes méthodes d’analyse -----	24
Figure 3.3 : Schéma représentatif du réducteur de CETIM -----	25
Figure 3.4 : photos d’une roue du banc de CETIM -----	26
Figure 3.5 : Nature d’une vibration -----	28
Figure 3.6 : Les représentations temporelles des signaux vibratoires issus du réducteur de CETIM -----	31
Figure 3.7 : Les scalogrammes obtenus par l’application de la transformée en ondelette de symlet sur les signaux vibratoires issus du réducteur de CETIM -----	34
Figure 3.8 : Les scalogrammes obtenus par l’application de la transformée en ondelette de Daubechies -----	37

Liste des tableaux :

Tableau 1.1 : Familles des ondelettes -----	09
Tableau 1.2 : Application des ondelettes dans la détection des défauts mécaniques -----	10
Tableau 3.1 : Caractéristiques du banc d’essai de CETIM -----	26
Tableau 3.2 : Rapport d’expertise -----	27
Tableau 3.3 : l’Etude comparative des différentes méthodes de détection des défauts des engrenages. -----	38



INTRODUCTION
GENERAL



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 également généralement différents. Par conséquent, il est important de choisir les techniques les plus efficaces pour la situation en cours de test en vue d'obtention de résultats fiables.

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'FFT 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].

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'efficacité d'analyse des signaux par la transformée en ondelette.

Pour montrer cette efficacité, la transformée en ondelette est appliquée pour l'analyse des signaux vibratoires issus d'un système d'engrenage afin de détecter la présence d'un défaut.

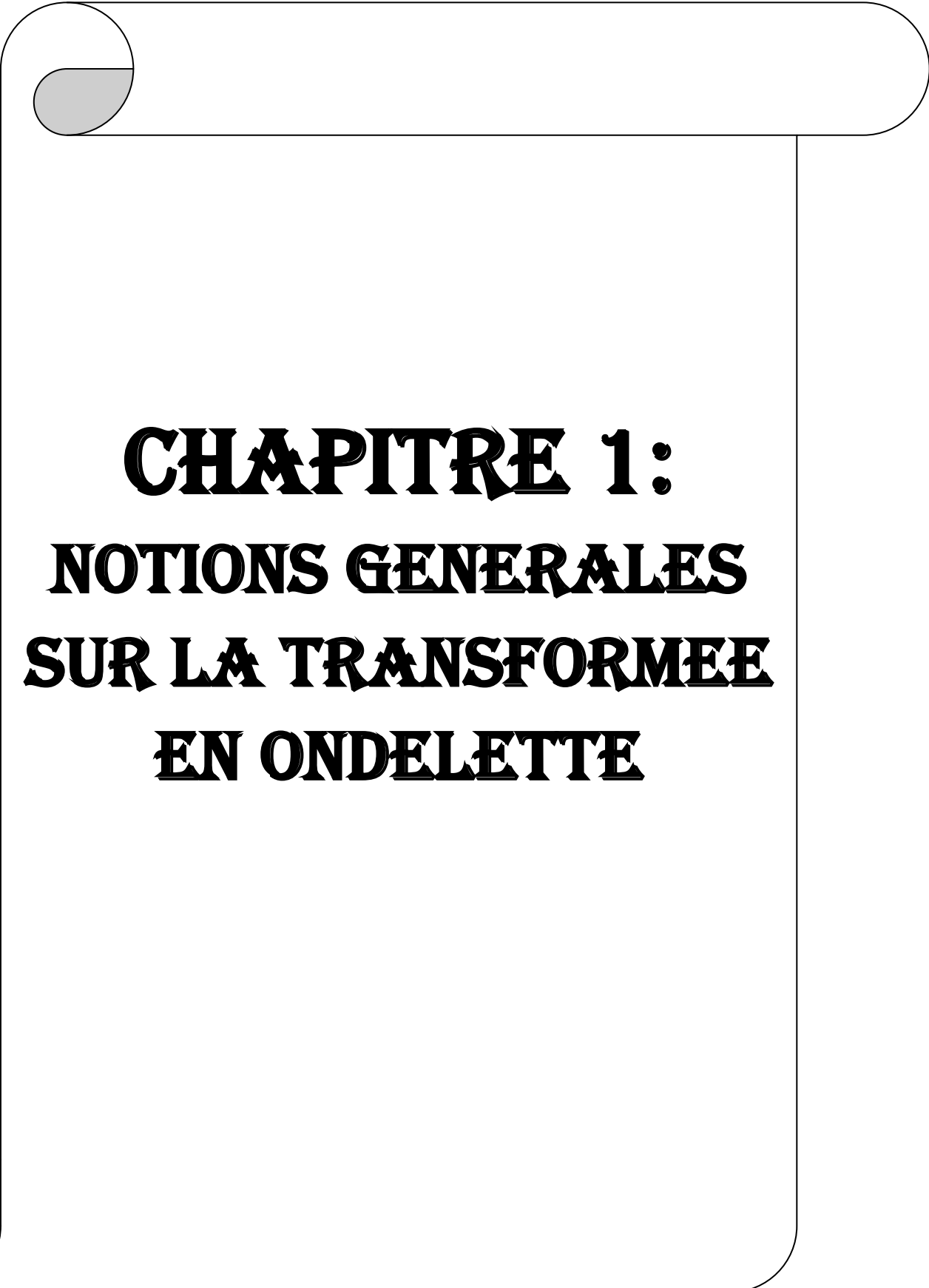
Le mémoire est organisé en trois chapitres :

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

Le deuxième chapitre sera **consacré** pour la validation de la transformée en 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 générale.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and rounded corners. The top and bottom edges are slightly curved. There are two grey, semi-transparent circular elements on the left side, one near the top and one near the bottom, resembling the ends of the scroll's binding.

**CHAPITRE 1:
NOTIONS GÉNÉRALES
SUR LA TRANSFORMÉE
EN ONDELETTE**

CHAPITRE 1: NOTIONS GENERALES SUR LA TRANSFORMEE EN ONDELETTE

1. Introduction

La transformée en ondelette (TO) est une méthode récente de traitement des signaux. Cette technique à une bonne propriété de localisation en temps et en fréquence. Dans ce chapitre, nous présentons quelques notions et définitions de base sur la transformée de Fourier puis la transformée en ondelette. Nous présentons également les familles des ondelettes qui en utilisent dans notre travail.

2. Historique

Le point de départ de la théorie des ondelettes est marqué par les travaux de Jean Morlet vers 1983. En effet, il a inventé les fonctions dites d'ondelettes pour traiter les signaux sismiques dans le cadre de son travail de géophysicien. Dès lors, les travaux de recherche se sont multipliés pour élaborer la théorie des ondelettes. On peut citer Alex Grossmann et Yves Meyer pour leurs contributions capitales aux fondements mathématiques des ondelettes. Une excellente introduction au sujet des ondelettes est présentée par Hubbard (1995) [3].

La meilleure façon d'introduire les ondelettes est de passer par l'analyse de Fourier. En effet, la transformée de Fourier est une décomposition d'un signal dans une base sinusoïdale. Chaque sinusoïde correspond à une fréquence donnée et pondérée par des coefficients, dits coefficients de Fourier. Par analogie, la transformée en ondelettes est une décomposition dans les bases d'ondelettes Daubechies (1992) [4]; Cohen (1992); Meyer (1993) [5].

Aujourd'hui, les ondelettes sont utilisées dans divers domaines d'application : traitement de parole et d'image, analyse biomédical, traitement des signaux vibratoires et autres.

3. Transformée de Fourier

Au 19^{ème} siècle (1822), le mathématicien français J. Fourier, a prouvé que n'importe quelle fonction périodique peut être exprimée comme une somme infinie de fonctions exponentielles complexes périodiques.

La transformation de Fourier $TF(f)$ associée à un signal $S(t)$ s'écrit comme suit [6] :

$$TF(S(t)) = X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1.1)$$

La transformée de Fourier inverse est donnée par :

$$S(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(S(t)) e^{(+j2\pi ft)} df \quad (1.2)$$

f : est la fréquence du terme sinusoïdal

$S(t)$: Le signal représentatif dans le domaine (amplitude-temps).

$X(f)$: Le signal représentatif dans le domaine (amplitude-fréquence).

Malgré que la transformée de Fourier reste la plus utilisée dans le traitement de différents types de signaux stationnaires mais a plusieurs inconvénients :

- Elle permet de connaître les différentes fréquences existantes dans un signal, mais ne permet pas de savoir à quels instants ces fréquences ont été émises.
- Elle ne permet pas l'étude de signaux dont la fréquence varie dans le temps, (signaux non stationnaires).
- Elle donne une information globale et non locale.
- Si le signal contient N points, sa TF nécessitera un nombre d'opérations égal à $N*N$.

Pour localiser dans le temps des fréquences d'un signal $s(t)$, nous utilisons la « Transformée de Fourier Fenêtrée ». Elle permet de donner une représentation « Temps – Fréquence » du signal.

3.1. Transformée de Fourier Fenêtrée

En 1940, D. Gabor [7] a présenté la première forme de représentation « Temps – Fréquence » appelée Transformée de Fourier Fenêtrée (TFF). Sa technique consiste à découper le signal en différentes plages de longueur fixe.

Chaque plage est étudiée séparément des autres par l'analyse traditionnelle de Fourier, juxtaposant les résultats sous la forme d'une représentation « temps – fréquence » ou « spectrogramme » [8].

C'est un outil de base pour l'analyse des signaux non-stationnaires.

La TFF consiste en la décomposition du signal $S(t)$ suivant une famille de fonctions $g_{a,b}$ qui dérivent toutes d'une même « fonction fenêtre » $g(t)$ par :

- Translation en temps (paramètre b)
- Modulation en fréquence (paramètre a)

La fonction g est multipliée par une fonction sinusoïdale de fréquence a

$$g_{a,b}(t) = g(t - b) * e^{2i\pi at} \quad (1.3)$$

Où le terme b localise une fenêtre d'analyse. Cette transformation s'écrit [8] :

$$c(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) * g_{a,b}(t) dt \quad (1.4)$$

$C(a, b)$ est la transformée de Fourier fenêtrée du signal $s(t)$ sur une fenêtre de largeur b , selon une fréquence a .

Cette transformation a quelque inconvénient majeur:

- On ne peut pas savoir quelle fréquence existe à un instant donné.
- Une fois que la fonction g est choisie, la résolution en temps et en fréquence, donnée par les variables a et b , est fixe.
- Si le signal est composé de phénomènes dont les échelles de temps sont différentes, elle ne permet pas de les analyser simultanément avec une bonne résolution en temps et en fréquence. Donc la taille fixe de la fenêtre est un gros inconvénient. L'outil idéal serait une fenêtre qui s'adapte aux variations de fréquence dans le signal à analyser. Cet outil existe, il s'agit de l'analyse par ondelettes.

4. Théorie des ondelettes

4.1. 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 et satisfait les conditions suivantes:

Pour $\varepsilon > 0$

$$|t|^{1/2+\varepsilon} \Psi \in L^2 \quad (1.5)$$

$$|f|^\varepsilon \hat{\Psi} \in L^2 \quad (1.6)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (1.7)$$

Où $\hat{\Psi}$ est la transformée de Fourier de Ψ .

L'ondelette est considérée comme une forme d'onde avec une durée effective limitée et une valeur moyenne nulle. Pour décomposer un signal $S(t)$ sur des fonctions d'ondelettes, il faut commencer avec une seule fonction bien localisée et bien oscillante $\Psi(t)$ appelée ondelette mère.

La mère des ondelettes va engendrer les autres ondelettes de la famille $\Psi_{a,b}(t)$ par dilatation et par translation dans le temps.

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1.8)$$

Avec $a, b \in \mathbb{R}$, $a \neq 0$.

-L'ondelette mère $\Psi(t)$ permet de déduire toutes les fonctions $\Psi_{a,b}(t)$ de la famille d'ondelettes.

-le paramètre (b) positionne l'ondelette sur l'axe du temps.

-le paramètre (a) contrôle la fréquence de l'ondelette (contraction: haute fréquence, dilatation: basse fréquence).

- Si $|a| \ll 1$, l'ondelette $\Psi_{a,b}(t)$ devient très concentrée de l'ondelette mère $\Psi(t)$ et le contenu fréquentiel tournera vers les hautes fréquences du plan d'analyse.
- Si $|a| \gg 1$, l'ondelette $\Psi_{a,b}(t)$ est très large et le contenu fréquentiel se déplacera vers les basses fréquences du plan d'analyse.
- Si on fait varier le paramètre de dilatation (a), l'ondelette garde le même nombre d'oscillation [2,9].

4.2. Transformée en ondelette

Le développement des théories de traitement des signaux sous-jacentes à la transformée en ondelette a débuté au milieu du siècle dernier avec les recherches de Gabor; toutefois, le concept d'ondelette ne fut introduit véritablement que durant les années 1980, par les travaux notamment de Morlet, Meyer, Daubechies et Mallat. L'appropriation des résultats des travaux de ces mathématiciens par les ingénieurs et chercheurs en quête de méthodes de traitement de signal toujours plus efficaces a entraîné l'éclosion ou l'amélioration de nombreuses applications dont plusieurs sont destinées à l'analyse des signaux vibratoires [10].

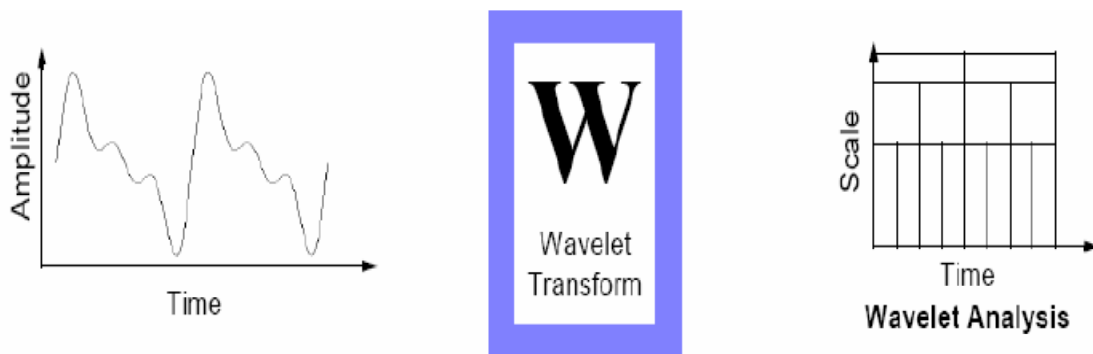


Fig.1.1 : Représentation temporelle vers ondelettes [11]

La transformation en ondelettes permet d'appliquer une analyse multi-résolution sur le signal étudié, La TO d'un signal $S(t)$ est la famille $C(a,b)$ coefficients d'ondelettes qui dépend des deux paramètres a et b où a est l'échelle et b est le facteur de position à analyser. Suivant les besoins de l'analyse du signal $S(t)$ les paramètres (a,b) peuvent être utilisés de façon continue ou discrète .

4.2.1 Ondelette Mère

L'analyse en ondelette est réalisée au moyen d'une fonction $\Psi(t)$ appelée ondelette de base (ou ondelette mère) qui permet de spécifier les caractéristiques de signal que l'on souhaite détecter. La TO permet de représenter n'importe quel signal par une base d'ondelettes qui ne sont que des versions dilatées et translatées de l'ondelette mère tel que [12] :

$$\Psi_b^a(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1.9)$$

$\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ Représente l'ondelette fille

b : Facteur de translation ;

a : Facteur d'échelle ;

$\Psi(t)$: Ondelette mère ;

$|a|^{-\frac{1}{2}}$: Facteur de normalisation de l'énergie afin que le signal transformé ait la même énergie à toutes les échelles ($a \neq 0$).

Notons que $\Psi(t)$ est dite ondelette [13] si :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (1.10)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(t)|^2 dt < \infty \quad (1.11)$$

$$0 < c_\Psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(w)|^2}{|w|} dw < \infty \quad (1.12)$$

c_Ψ est la constante d'admissibilité (condition) et $\Psi(w)$ la transformée de Fourier de $\Psi(t)$.

Une caractéristique de l'ondelette dilatée est d'être plus diffuse dans le temps et donc d'avoir un spectre plus concentré autour de sa fréquence centrale.

4.2.2. La transformée en ondelette continue (TOC)

La transformée en ondelette continue (TOC) utilise des translations et des dilatations de la fonction ondelette mère durant tout l'intervalle temporel de manière continue . les coefficients d'ondelettes continue sont définie par :

$$cwt_x(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot \Psi_b^a(t) dt \quad (1.13)$$

Le scalogramme, défini par le carré du module de la transformée en ondelettes continues, est :

$$SC_x(a, b) = |cwt_x(a, b)|^2 \quad (1.14)$$

La TO a la capacité de changer la taille de la fenêtre à différentes résolutions de temps fréquence. Grace au changement d'échelle (en utilisant le facteur d'échelle a les fonctions de base d'ondelette peuvent être étirées ou comprimées dans la fenêtre d'analyse . Ceci aide à isoler des discontinuités du signal parce que de courtes fonctions de base sont employées pour obtenir l'information détaillée de fréquence tandis que de longues fonctions de base sont employées pour rechercher l'information approximative de fréquence du signal.

La translation (en utilisant le facteur de translation b) est l'opération de glissement de l'ondelette tout au long du signal . c'est la technique similaire à celle de la TFCT.

La transformée en ondelette inversée est :

$$x(t) = \frac{1}{c} \int_{a=0}^{+\infty} \int_{b=-\infty}^{+\infty} \frac{cwt_x(a,b)}{a^2} \Psi_b^a(t) \quad (1.15)$$

$\Psi(\frac{t-b}{a})$ représente l'ondelette fille et C_Ψ : constant d'admissibilité (condition)

La transformée en ondelette continue se déroule selon les étapes suivantes :

1. Prendre une ondelette et la comparer à une section au début du signal original.
2. Calculer le coefficient $CWT_x(a,b)$.
3. Translater l'ondelette à droite et répéter l'étape 1 et 2 sur tout le signal.
4. Dilaté ou compresser l'ondelette et répéter l'étape 1 à 3.
5. Répéter les étapes 1 à 4 pour toutes les échelles choisies.

Quand l'ondelette est dilatée , l'analyse explore les composantes du signal qui oscillent plus lentement .

Quand elle est contractée , l'analyse explore les oscillations rapides comme celles contenues dans une discontinuités du signal. Par ce changement d'échelle (contraction-dilatation), la transformée en ondelette amène à une décomposition temporelle du signal.

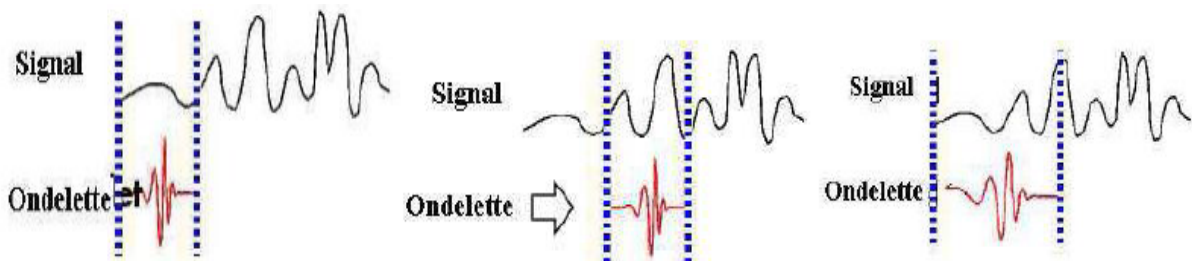


Fig.2.2 :Principe de la Transformée en ondelette Continue .

4.2.3. Transformée en ondelette discrète

La transformée en ondelette discrete (TOD) est produite pour surmonter le problème de la TOC. En effet il est évident que la TOC ne peut être manuellement calculée en utilisant les équations analytiques, le calcul intégral, est, c'est donc aux ordinateurs de calculer cette transformées. Il devient donc nécessaire de discrétiser les transformées. La TOD, contrairement à la TOC, fournit suffisamment d'information, tant pour l'analyse que pour la reconstruction du signal original, en un temps de calcul notablement réduit.

la TOD translate et dilate l'ondelette selon des valeurs discrètes des facteurs d'échelle et de translation telles que :

$$a = a_0^j$$

$$d = kd_0 a_0^j$$

Ou : $a_0 > 1 ; d_0 > 0 ; k, j \in Z$

Les coefficients de la TOD sont définie par [14] :

$$D_x(a_0, b_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \Psi_b^a(t) dt \quad (1.16)$$

Avec :

$$\Psi_{b_0}^{a_0}(t) = |a_0^j|^{\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t - kd_0 a_0^j}{a_0^j}\right) \quad (1.17)$$

Dans la majorité des cas, on utilise $a_0 = 2$ et $b_0 = 2$ l'on obtient la transformée en ondelette discrete dyadique, la signal original $x(t)$ peut être reconstruit à partir des coefficients obtenus par la

transformée en ondelette discrete et il est donné par l'équation suivante :

$$x(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} D_x(a_0, b_0) \cdot |a_0^j|^{\frac{-1}{2}} \Psi\left(\frac{t - kd_0 a_0^j}{a_0^j}\right) \quad (1.18)$$

Dans la transformée en ondelette discrete, on parle souvent d'approximation et de détail.

L'approximation correspond à la haute échelle, c'est-à-dire aux composantes de basse fréquence du signal. Les détails sont à basses échelles c'est les composantes de hautes fréquences. Notons qu'approximation et détail émergent comme deux signaux lorsque le signal original traverse deux filtres complémentaires.

4.2.4. Familles des ondelettes

Avant de détailler quelques familles des ondelettes usuelles, nous dressons dans le tableau suivant (Tab.1.1) la liste de quelques unes de ces familles, avec les abréviations associés [15].

Nom des familles des ondelettes	Abréviations
Ondelette de Haar	<i>Haar</i>
Ondelettes de Daubechies	<i>Db</i>
Ondelettes Symlets	<i>Sym</i>
Ondelettes Coiflets	<i>Coif</i>
Ondelettes biorthogonales	<i>Bior</i>
Ondelette de Meyer	<i>Meyr</i>
Ondelettes gaussiennes	<i>Gaus</i>
Ondelettes gaussiennes complexes	<i>Cgau</i>
Chapeau mexicain	<i>Mexh</i>
Ondelette de Morlet	<i>Morl</i>
Ondelette de Morlet complexe	<i>Cmor</i>
Ondelettes de Shannon complexes	<i>Shan</i>

Tab.1.1 : Familles des ondelettes [15]

4.2.5. Divers applications des ondelettes dans la détection des défauts

Les domaines d'application de la décomposition en ondelettes sont vaste est se résument comme suits :

- Elle est utilisée à des fins de détection des signaux transitoires.
- Elle est utilisée dans les domaines de détection des contours dans les images, dans la compression et le traitement de la parole.
- Détection des paramètres des signaux électro-physiologiques tels que les paramètres du signal électrocardiogramme ECG (complexe QRS, l'onde P, l'onde S ...) aussi l'analyse de l'EEG, ou bien l'EMG.

Les ondelettes ont de nombreuses applications dans l'analyse des signaux vibratoires. D'après cette étude, nous pouvons remarquer que différentes ondelettes et techniques ont été utilisées pour le même type de signal d'engrenage ou de roulement [16].

Type	Technique	Élément mécanique	Ondelette	Type du signal
DWT	vibration	Engrenage+roulement	Db4	Réel (Westland)
CWT	vibration	Engrenage	Morlet	réel
DWT	vibration	Engrenage	Db20	réel
CWT	vibration	Engrenage + roulement	Morlet Haar	simulé
DWT, CWT	vibration	Engrenage	Db8	Réel
DWT	vibration	Roulement	Moret, Meyer, Db10	Réel
CWT	vibration	Engrenage, roulement	Toute les Ondelette	Réel
DWT	vibration	Roulement	Laplace ondelette	Simulation (roulement)
CWT	vibration	Engrenage	Morlet	Simulé, réel

Tab.1.2 : Application des ondelettes dans la détection des défauts mécaniques [17].

4.2.6. Choix de l'ondelette

Dans la littérature il existe plusieurs types d'ondelette mais le choix de la meilleure ondelette reste un problème à résoudre. Il n'y a pas d'ondelette qui soit meilleure que les autres, tout dépend de l'application. Une ondelette peut être optimale pour certaines applications et mauvaise pour d'autres.

L'analyse du choix de l'ondelette sera effectuée sur la base d'un test de plusieurs ondelettes analysantes de Daubechies et de Symlet.

4.2.6.1 Ondelettes de Daubechies

Cette famille d'ondelettes (dbN) à un paramètre, due à I. Daubechies [2], est la première permettant de manipuler des ondelettes orthogonales à support compact de régularité arbitraire, on dira que N est l'ordre de l'ondelette dbN .

Cette famille contient l'ondelette de Haar ($db1$), qui est la plus simple et certainement la plus ancienne des ondelettes. Elle est discontinue, ressemble à un échelon.

Les ondelettes de cette famille n'ont pas une formule analytique. Ces ondelettes pour les ordres de 2 à 10 ($db2, db3, \dots, db10$) sont présentées dans la figure (Fig.1.4).

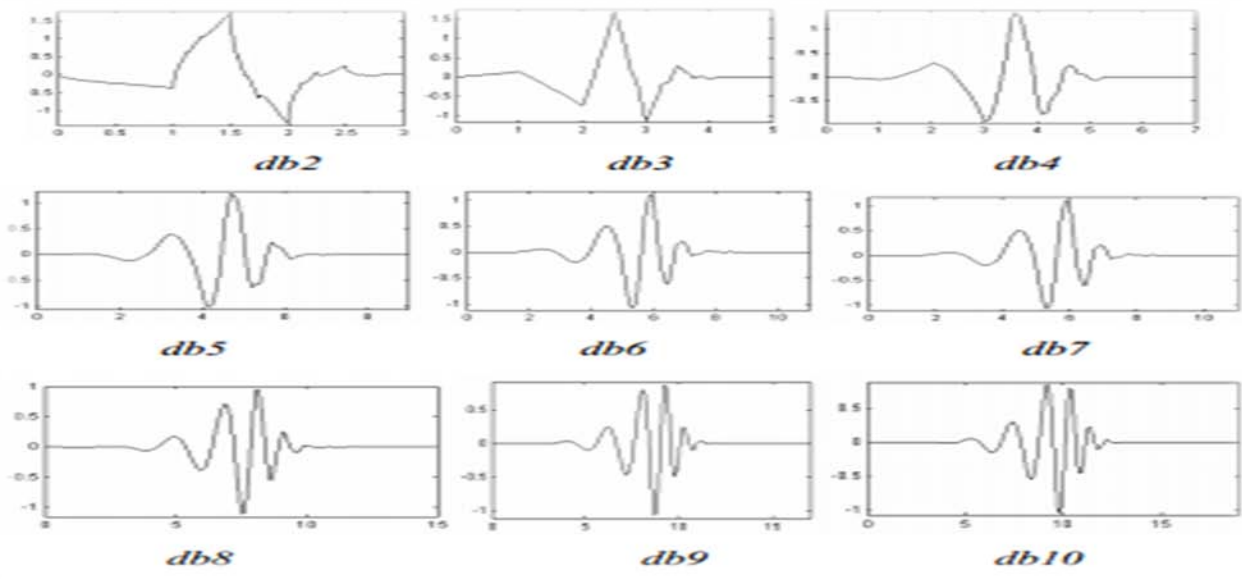


Fig.1.4 : Les ondelettes de Daubechies

4.2.6.2. Ondelettes de Symlets

Les symlets ($SymN$) constituent une famille d'ondelettes presque symétrique, proposée par I.Daubechies en modifiant la construction des DbN . A part la symétrie, les autres propriétés des deux familles sont similaires. Les symlets d'ordre 2 à 8 ($Sym1$ est simplement l'ondelette de Haar) sont présentées dans la figure (Fig.1.3) [2].

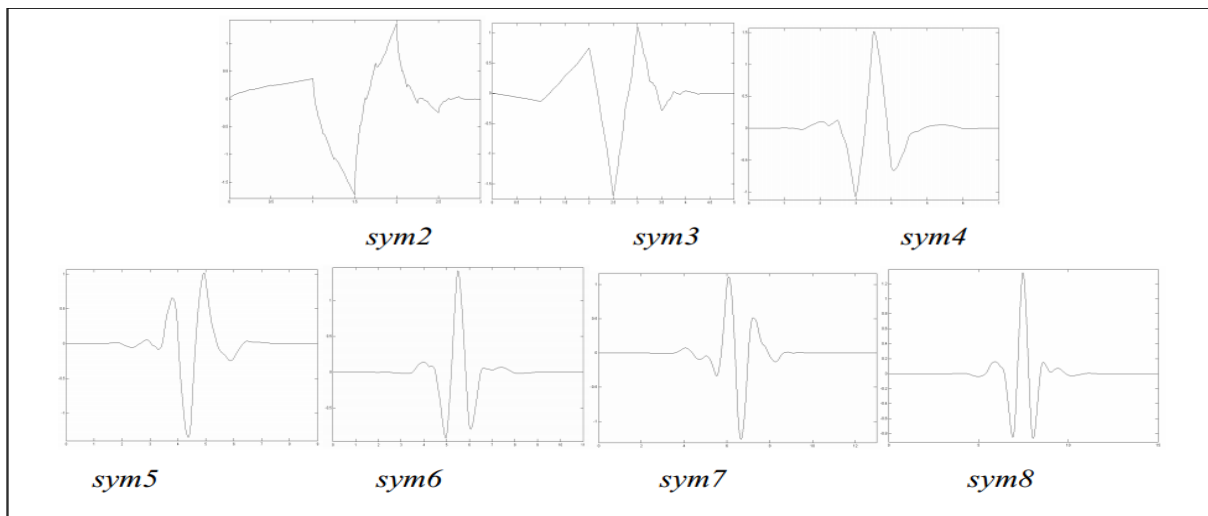


Fig.1.3 : Les ondelettes de symlets

5. Avantages et inconvénients de la transformée en ondelettes

Les avantages qu'offrent la transformée en ondelettes (TO) dans l'analyse temps-échelle sont les suivants :

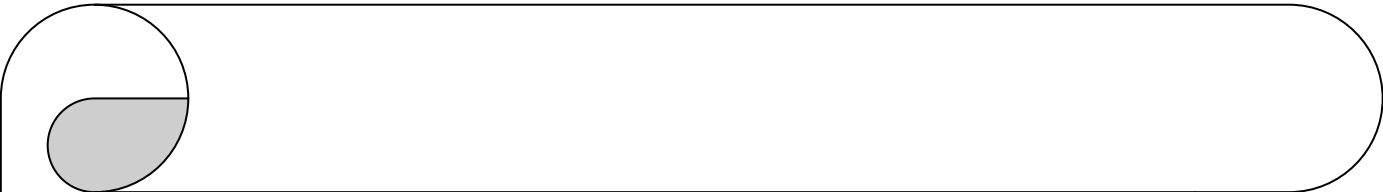
- Travailler en sous bandes avec la possibilité de séparer les composantes du bruit du reste du signal,
- la transformée en ondelettes offre une grande aptitude à prendre en charge plusieurs traitements numériques du signal de façon quasi simultanée (fenêtrage, débruitage, détection, filtrage et reconstitution du signal),

Les inconvénients de la transformée en ondelettes sont les suivants :

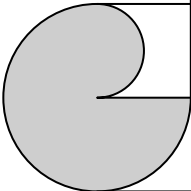
- Les ondelettes n'existent pas à un instant spécifique ou à une fréquence spécifique. Elles sont bien localisées dans le temps en fréquence mais pas avec une grande précision,
- Elle nécessite un bon choix d'ondelette mère analysante pour les différentes applications. En effet, le choix de l'ondelette utilisée pour la décomposition temps-échelle est le point le plus important et très difficile.

6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre des notions théoriques sur la transformée en ondelettes, par littérateur La transformée en ondelettes est un nouvel outil mathématique particulièrement appropriée à l'analyse des signaux de vibration non stationnaires, la transformée en ondelettes utilise des tailles de fenêtre variables (l'ondelette mère) pour l'ensemble du signal; ce qui permet d'obtenir une bonne résolution en temps et en fréquence .On conclure que le choix d'une telle ou telle ondelette n'est pas facile et dépend beaucoup de l'objectif à atteindre et de la situation donnée.



CHAPITER 2 :
VALIDATION DE LA
TRANSFORMÉE EN
ONDELETTE PAR DES
SIGNAUX DE TEST.



CHAPITRE 2 :

Validation de la transformée en ondelette par des signaux de test.

1. Introduction

Cette section est réservée à la validation et le test de la technique de la transformée en ondelette. Pour cela, on a utilisé des signaux de test disponibles dans la littérature. 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 ondelette. Nous avons opté pour l'environnement de programmation et de simulation: **MATLAB(R2009a)**.

2. Différentes méthodes d'analyse et traitement de signal

Les techniques, utilisées pour l'analyse vibratoire, sont classées selon le domaine en trois classes : le domaine temporel, le domaine fréquentiel et le domaine temps-fréquence.

2.1. Analyse temporelle

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 [20].

2.2. Analyse spectral

C'est la technique la plus ancienne, ses bases mathématiques remontant au dix-septième siècle suite aux travaux de Sir Isaac Newton, le premier qui a introduit le mot spectre comme terme scientifique. Ce n'est qu'en 1822 que l'ingénieur Français Jean Baptiste Fourier introduisit sa célèbre transformée qui porte toujours son nom [23]. Plusieurs travaux ont succédé à ceux de Fourier, les plus marquants sont sûrement ceux des Américains Cooley et Tukey qui, en 1956, ont donné naissance à un algorithme permettant une transformée de Fourier rapide, fréquemment nommée FFT (Fast Fourier Transforme).

Mathématiquement la transformée de Fourier permet de mettre en évidence les différentes périodicités contenues dans le signal original.

2.3. Analyse temps-fréquence

Dans l'analyse temps-fréquence, on trouve plusieurs méthodes tels que: STFT (Short Time Fourier Transform), HHT (Hilbert-Huang Transform), WVD (Wigner Ville Distribution), Transformée en ondelette et autres. Venant combler les limites de l'FFT, l'analyse par ondelettes est une méthode de traitement de signaux récente qui a fait l'objet de plusieurs applications. Elle est adaptée spécialement pour l'analyse des signaux transitoires [21].

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 scalogrammes. Pour évaluer les performances et l'efficacité de cette méthode, nous avons utilisé des signaux simulés qui reflètent le mouvement vibratoire, et on a choisie l'ondelette de Symlet et Daubechies de l'ordre 2.

3.1 .Signal sinusoïdal

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

$$s(t) = 1. \sin(2. \pi. 100. t) \quad (2.19)$$

Un signal sinusoïdal représente généralement la manifestation vibratoire d'un déséquilibre, d'un engrenement parfait et d'un déversement de la bague fixe d'un roulement [22].

Les résultats de simulation dans les divers domaines d'analyse de signal sinusoïdale sont donnés sur la figure 2.1.

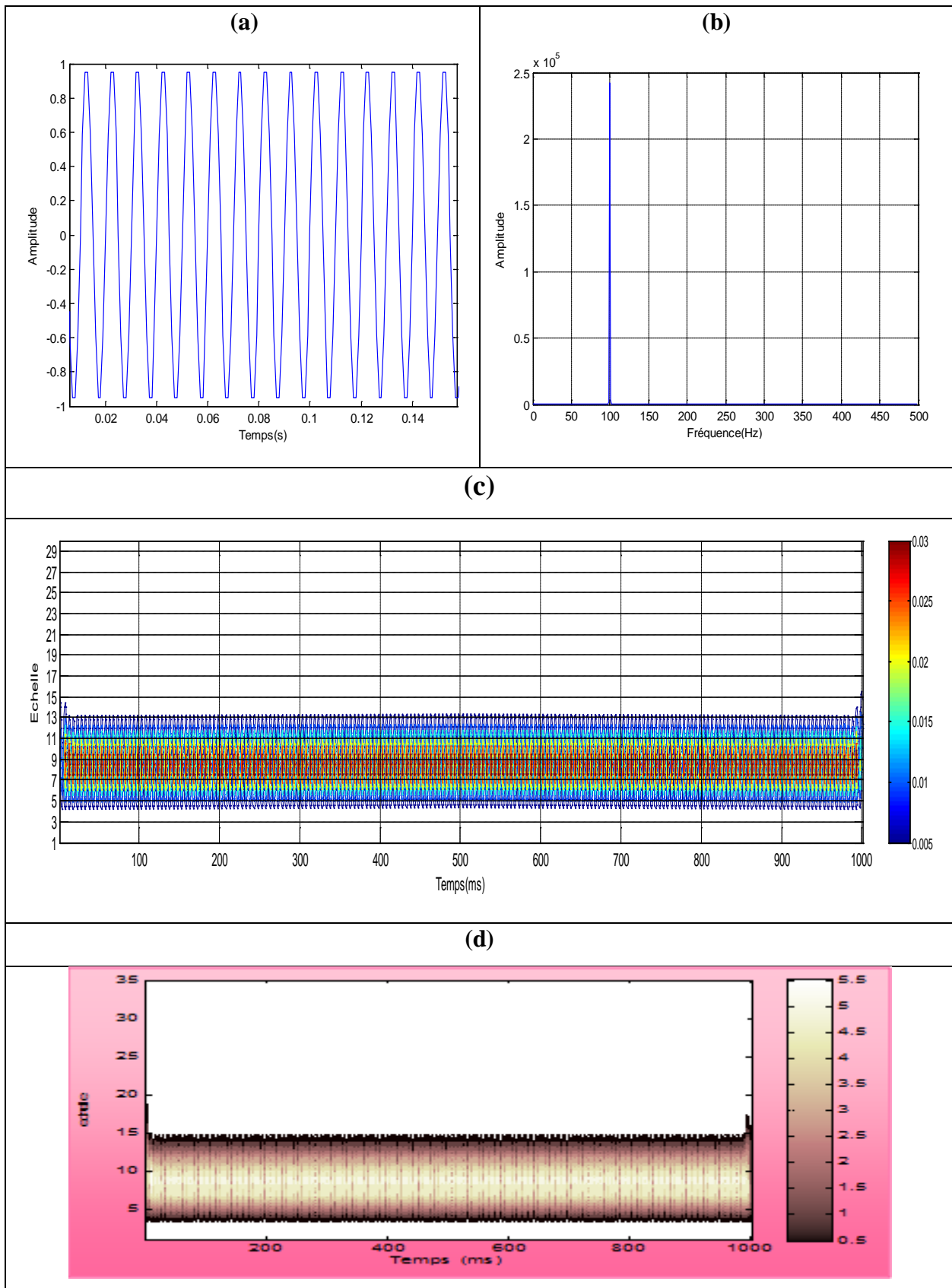


Fig2.1 : Signal sinusoidal: (a) Représentation temporelle, (b) Spectre de fréquence, (c) Scalogramme obtenu avec l'ondelette de Symlet, (d) scalogramme obtenu avec l'ondelette de Daubechies (db2).

Le signal sinusoïdal, dans le domaine temporel, illustrée sur la Fig.2.1. (a) et sa représentation fréquentielle (Fig.2.1(b)) montre que l'analyse par la FFT de signal sinusoïde simple donne une oscillation avec un seul pic correspondant à la fréquence de sinusoïde.

Les scalogrammes de la transformée en ondelette de Symlet et de Daubechies (db2), représentés en Fig.2.1. (c) et Fig2.1. (d) respectivement, montrent que le signal sinusoïdale avec une seule fréquence permet clairement d'observer la fréquence du signal par des coefficients sous forme d'une bande parallèle à l'axe des abscisses.

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 [20].

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 [21].

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 [21].

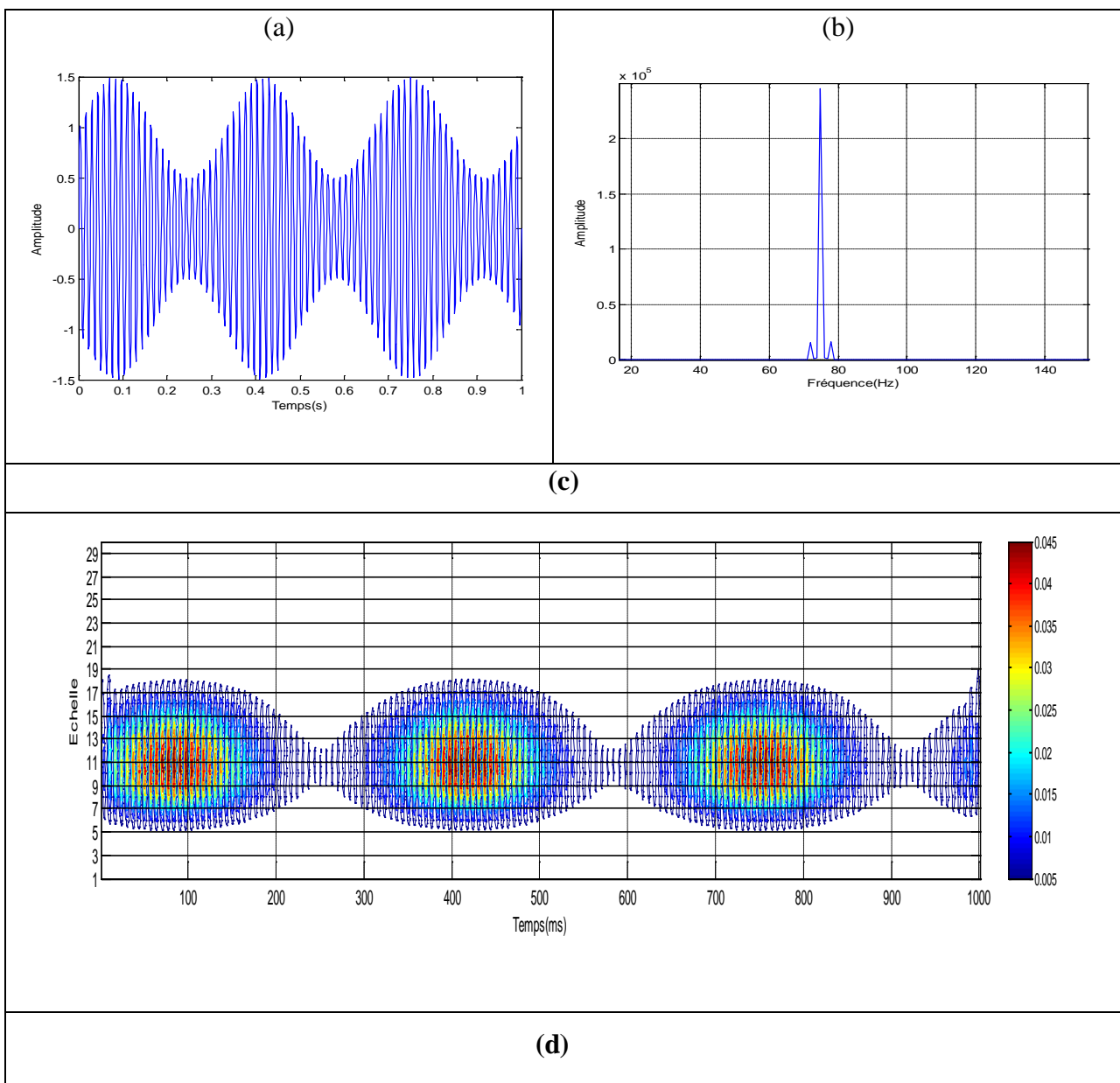
3.2.1 Effets de modulation d'amplitude

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 :

$$s(t) = [1 + 0.5 \times \sin(6 \times \pi \times t)] \times \sin(150\pi t) \quad (2.20)$$

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 d'amplitude instantanée [22].

Les résultats de simulation de signal modulée en amplitude dans le divers domaine d'analyse Sont donnée sur la Fig.2.2.



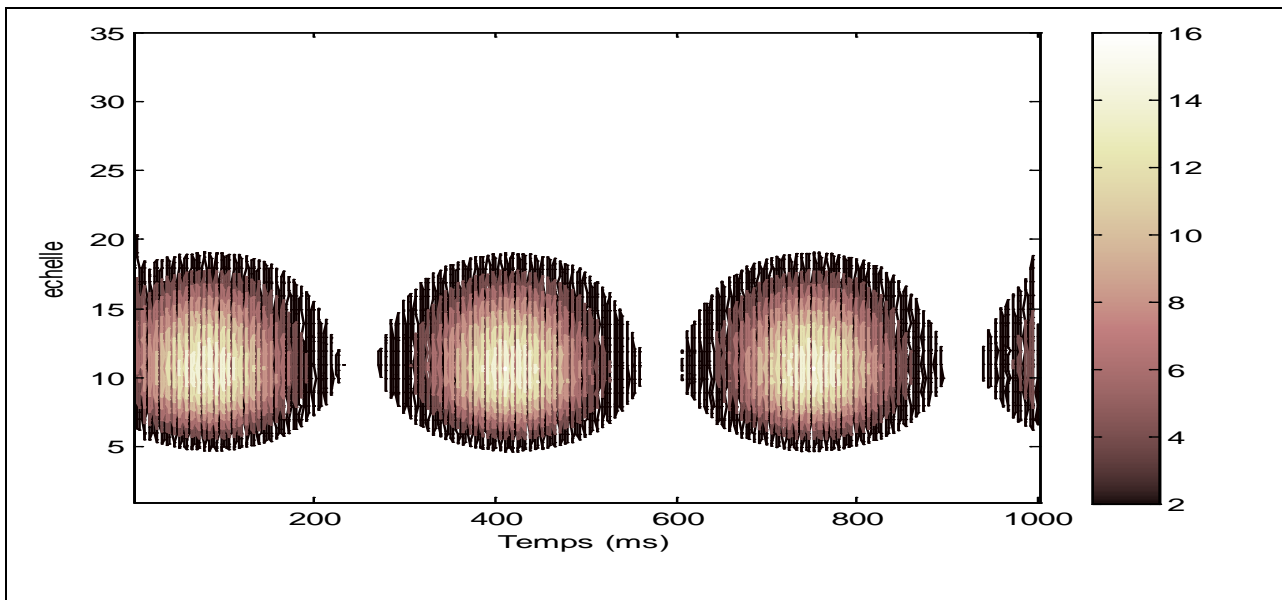


Fig. 2.2 : Signal modulé en amplitude: (a) Représentation temporelle, (b) Spectre de fréquence (c) Scalogramme avec l'ondelette de Symlet, (d) Scalogramme obtenu avec l'ondelette de Daubechies.

La Fig.2.2. (b) représente le spectre de fréquence obtenu par la FFT de signal modulé en amplitude, se limitera alors aux trois pics, un pic correspond à la fréquence de signal porteuse avec des pics latérales espacées de la fréquence de modulation et dont l'ordonnée respective sera proportionnelle à l'amplitude de chacune des signaux.

Dans les scalogrammes de signal modulé en amplitude donnée sur la Fig.2.2. (c) et Fig2.2. (d), nous observons des coefficients sous forme de blocs semblables à une modulation d'amplitude du signal.

3.2.2. Effets de modulation de fréquence

Le signal de test utilisé est celui de Chirp, il est donné par:

$$s(t) = \cos(2 \times (10 + 80.t) \times \pi.t) \quad (2.21)$$

Le signal Chirp est un type de signal avec une amplitude constante, tandis que la fréquence change d'une valeur basse en une valeur haute en un temps donné.

Les résultats de simulation dans le divers domaine d'analyse de signal sinusoïdale sont donnés sur la figure 2.3.

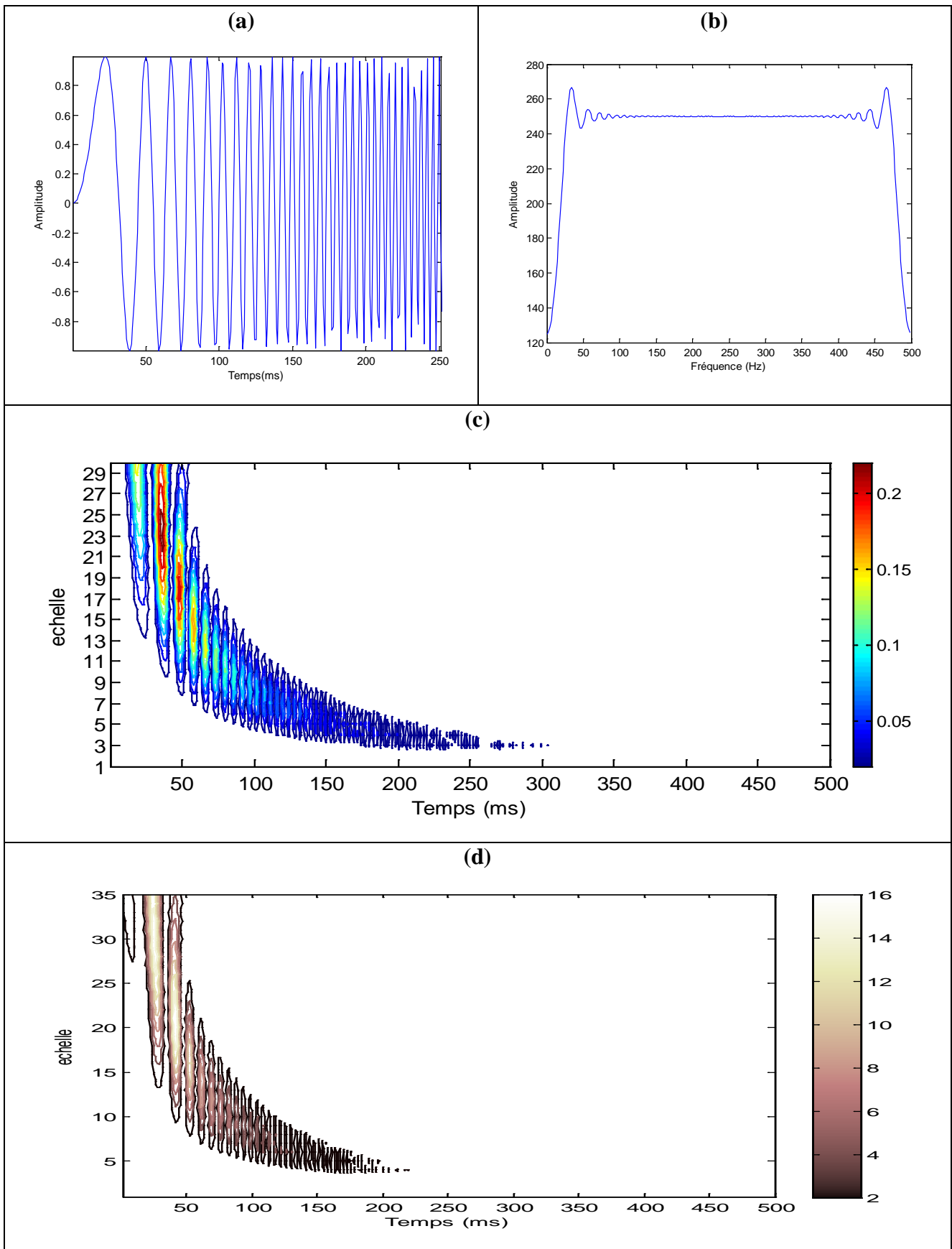


Fig.2.3 :Signal modulé en fréquence: (a) Représentation temporelle, (b) Spectre de fréquence (c) Scalogramme avec l'ondelette de Symlet, (d) Scalogramme obtenu avec l'ondelette de Daubechies.

La Fig. 2.3. (b) montre le spectre de fréquence de signal modulé en fréquence obtenu par FFT. Nous observons le balayage des fréquences de 0 jusqu'au 500 Hz interprété par le changement de 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.

Les scalogrammes de la transformée en ondelette Symlet et transformée en ondelette de Daubechies d'un signal modulé en fréquence sont représentés en Fig. 2.3. (c) et Fig. 2.3. (d) respectivement. Nous observons bien cette modulation de fréquence par les variations des coefficients de la transformée en ondelette.

3.2.3 Modulation d'amplitude et de fréquence

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

$$s(t) = [1 + 0.5 \times \sin(6 \times \pi \times t)] \times \sin(100 \times \pi \times t^2) \quad (2.22)$$

Un signal modulé en amplitude et en fréquence représente généralement un défaut de denture des engrenages [24].Le changement dans les conditions mécaniques d'un système d'engrenage peut produire des changements dans le signal vibratoire qu'il génère [18 ,23]. Ces changements peuvent prendre une forme d'augmentation d'amplitude ou de fréquence qui va conduire à une modulation d'amplitude ou de fréquence.

Les résultats de simulation dans le divers domaine d'analyse de signal sinusoidale sont donnés sur la figure 2.4.

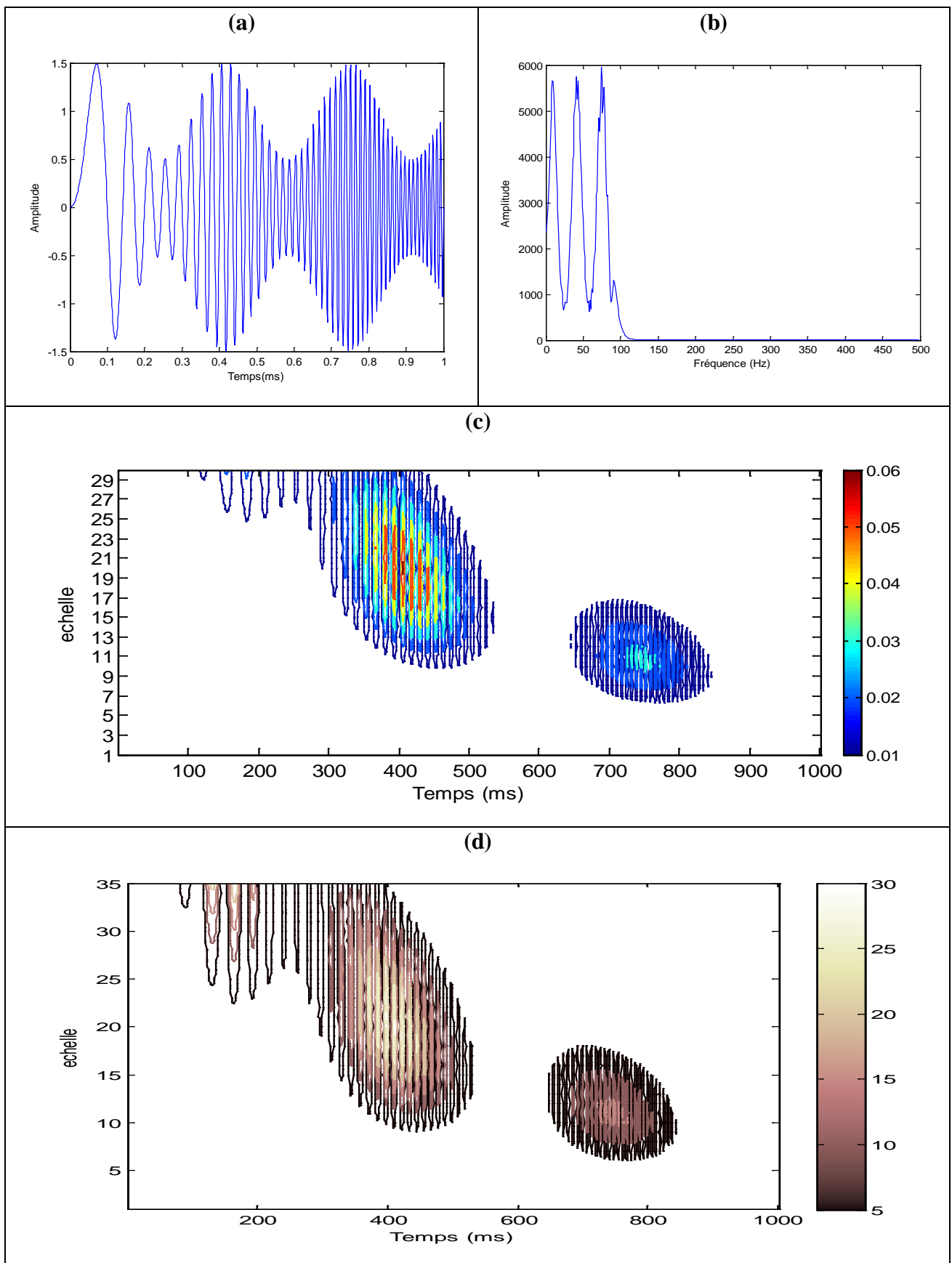


Fig.2.4 : Signal modulé en amplitude et en fréquence: (a) Représentation temporelle,(b) Spectre de fréquence (c) Scalogramme avec l'ondelette de Symlet, (d) Scalogramme obtenu avec l'ondelette de Daubechies.

Le spectre de fréquence de signal modulé en amplitude et en fréquence est illustré dans la Fig.2.4 Nous observons un ensemble des pics qui montre une variation d'amplitude (modulation d'amplitude) avec une variation de fréquence qui n'est pas linéaire qui signifie la modulation de fréquence.

Les scalogrammes de ce signal, donné sur la Fig.2.4. (c) et Fig.2.4. (d), montre que la modulation d'amplitude se traduit par la variation d'amplitude des coefficients et la modulation de fréquence par leur localisation non linéaire pour les deux ondelettes.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons testé la technique de la transformée en ondelette à l'aide des signaux de test disponibles dans la littérature.

Les scalogrammes obtenus par la transformée des deux ondelettes Symlet de l'ordre 4 et Daubechies de l'ordre 2 donnent des représentations significatives des signaux de test.

Le prochain chapitre est réservé à l'application de la transformée en ondelette sur les signaux vibratoires réels pour détecter les défauts des engrenages.

CHAPITRE 3 :
VALIDATION DE LA
TRANSFORMÉE EN
ONDELETTE PAR DES
SIGNAUX
VIBRATOIRES RÉELS

CHAPITER 3 :

Validation de la transformée en ondelette par des signaux vibratoires réels

1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse des signaux d'engrenage réels déjà utilisés par d'autres chercheurs. Des signaux d'engrenage enregistrés au CETIM (centre d'études techniques et industries mécaniques, Saint Etienne, France) ont été décomposés, montre qu'une roue sans défaut et une roue avec un défaut d'écaillage, nous allons appliquer la technique de la transformée en 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.

2. Défauts d'engrenage

L'engrenage est un des mécanismes élémentaires les plus utilisés pour transmettre du mouvement, et adapter les vitesses de rotation entre organes moteurs et récepteurs. Il est constitué de deux roues dentées mobiles autour d'axes de rotation, et dont l'une entraîne l'autre par l'action de dents successivement en contact.

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 [24].



Fig.3.1 : Systèmes d'engrènement.[25]

2.1 Techniques d'analyse

La surveillance d'un équipement de machine est assurée en relevant périodiquement un indicateur d'état de dégradation ou de performance, il existe différentes techniques d'analyse

(figure 3.2) tels que l'analyse vibratoire, l'émission acoustique, la thermographie, l'analyse des huiles et des lubrifiants, la variation de résistance dans un circuit électrique, etc....

Le choix de l'indicateur dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter. Pour les machines tournantes, un indicateur de type vibratoire permet de détecter la plupart des défauts, on établit une courbe d'évolution de l'indicateur au cours du temps. Sur cette courbe, on définit différents seuils correspondant à un niveau d'alerte, à une alarme, à un niveau de défaillance, ces niveaux sont établis soit par expérience soit en appliquant une norme pour les roulements, on utilise des abaques de sévérité vibratoire pour définir les différents seuils [26].

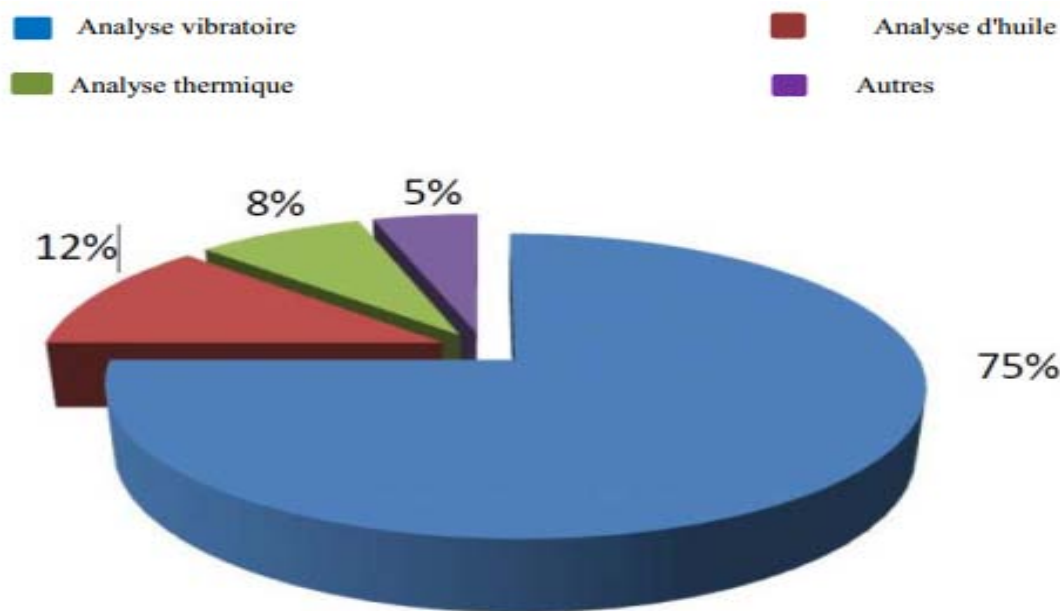


Fig. 3.2 .Différentes méthodes d'analyse. [26]

2.2 Principales sources des vibrations

Parmi les sources essentielles d'excitation d'un engrenage en mouvement on peut noter :

- L'erreur de concentration dans les roues à engrenage qui provoque des vibrations.
- La modification du profil due à l'erreur de fabrication et à la déformation des dents.
- L'influence des arbres et grandeurs des masses (accouplement, moteur,...) sur la charge dynamique
- Les chocs entre les dents à l'amorce de l'engrènement lorsque la dent non déformée supporte une fraction de la charge tandis que les autres dents se déchargent.
- La déformation variable des dents produit la variation de la charge le long des profils des dents et une variation de la charge à travers la ligne d'engrènement pour une paire de dents en contact.
- Les forces de frottement variables en sens.

- L'expulsion de l'huile et de l'air de l'entre dent.
- Les fluctuations de la charge des dents surviennent durant l'engrènement des dents même dans les conditions de la charge constante. [27]

3. Description du système étudié

Les signaux vibratoires sur lesquels nous avons effectués les tests de la validité et de l'efficacité des méthodes proposées proviennent d'un réducteur de CETIM (Centre d'Études Techniques des Industries Mécanique, 52 av. Felix Louat, 60300 Senlis, France) [28- 31]. 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 16.67Hz. 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 :

$$f_e = z_1 \cdot f_1 = z_2 \cdot f_2 \quad (3.23)$$

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

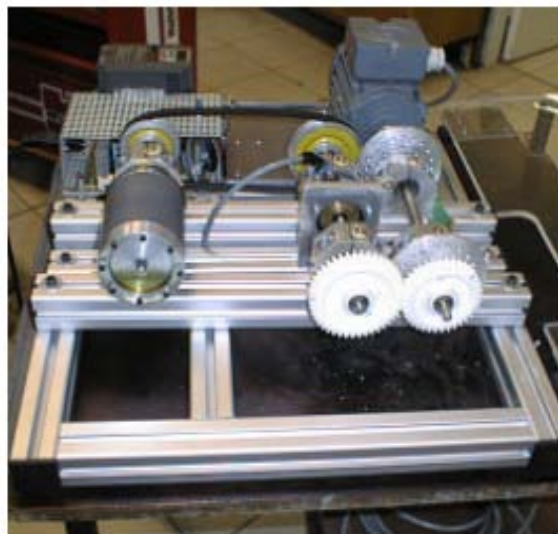
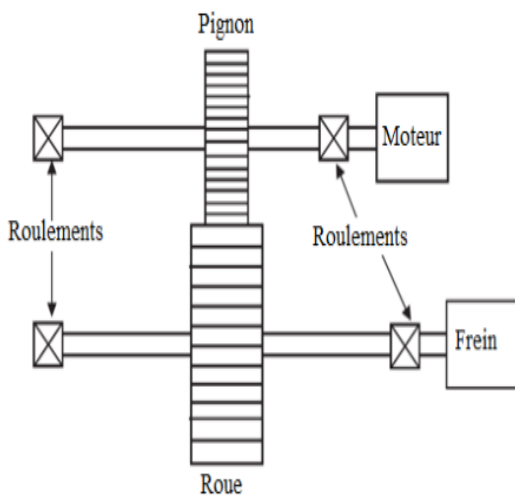


Fig.3.3 : Schéma représentatif du réducteur de CETIM [32, 33].

Les caractéristiques techniques du banc d'essai de CETIM sont données au tableau 3.1.

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 3.1: Caractéristiques du banc d'essai de CETIM [34 -37].

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

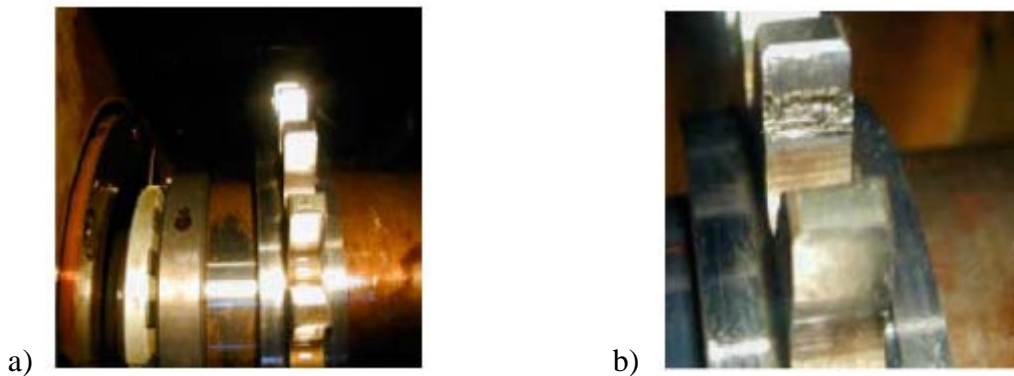


Fig.3.4 : photos d'une roue du banc de CETIM : (a) sans défaut, b) avec défaut [38]

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.3.2 : Rapport d'expertise [39], [40].

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.

4. Vibration mécanique

4.1 Définition d'une vibration

La norme ISO 2041 « vibrations et chocs - vocabulaire (Août 1990) » définit la notion de vibration comme étant la variation avec le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque l'intensité est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence. En fait, un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence. Ce déplacement par rapport à cette position peut être provoqué par une force mécanique non désirable. Ainsi, un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il oscille autour de sa position d'équilibre [41].

4.2 Caractéristiques d'une vibration

Une vibration se caractérise principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature.

a. Fréquence

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné.

Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en hertz [Hz].

1 hertz = 1 cycle/seconde.

Une vibration qui se produira 20 fois par seconde aura donc une fréquence f de 20 hertz. [42]

b. Amplitude

On appelle amplitude d'une onde vibratoire la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre et on peut définir.

L'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelée amplitude crête ou niveau crête, l'amplitude double, aussi appelée l'amplitude crête à crête ou niveau crête-crête. [42]

c. Nature d'une vibration

Une machine tournante quelconque en fonctionnement génère des vibrations que l'on peut classer de la façon suivante:

Les vibrations périodiques de type sinusoïdal simple [figure 3.5. a] ou sinusoïdal complexe [figure 3.5.b] représentatives du fonctionnement normal ou anormal d'un certain nombre d'organes mécaniques (rotation de lignes d'arbres, engrènements,...) ou d'un certain nombre d'anomalies (déséquilibre, désalignement, déformations, instabilité de paliers fluides, déversement de bagues sur

roulements,...).

Les vibrations périodiques de type impulsionnel [figure.3.5. c] sont appelées ainsi par référence aux forces qui les génèrent et à leur caractère brutal, bref et périodique. Ces chocs peuvent être produits par des événements normaux (presses automatiques, broyeurs à marteaux, compresseurs à pistons, ...) ou par des événements anormaux comme l'écaillage de roulements ou un défaut sur des engrenages, un jeu excessif, ...

Les vibrations aléatoires de type impulsionnel [figure 3.5.d] peuvent, par exemple, être générées par un défaut de lubrification sur un roulement, la cavitation d'une pompe. [42]

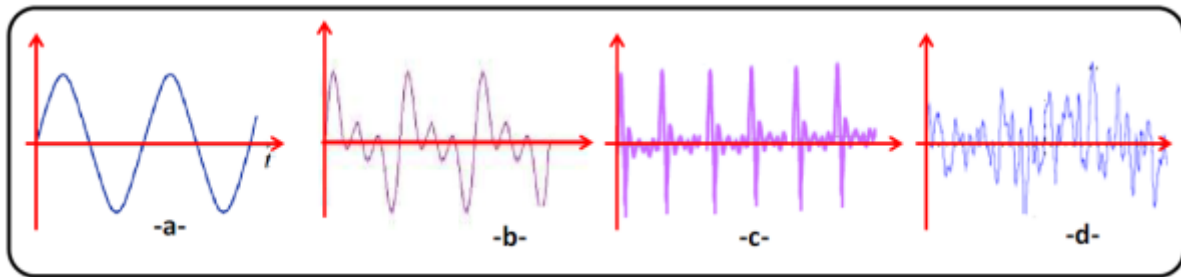


Fig.3.5 : Nature d'une vibration. [42]

4.3 Objectifs d'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

- la détection des défauts
- l'analyse détaillée des défauts.

On utilise à cet effet des paramètres calculés :

- soit dans le domaine temporel,
- soit dans le domaine fréquentiel,
- soit dans les deux à la fois [43].

a. Les avantages

- détection de défauts à un stade précoce,
- Possibilités de réaliser un diagnostic approfondi,
- autorise une surveillance continue,
- permet de surveiller,
- l'équipement à distance,

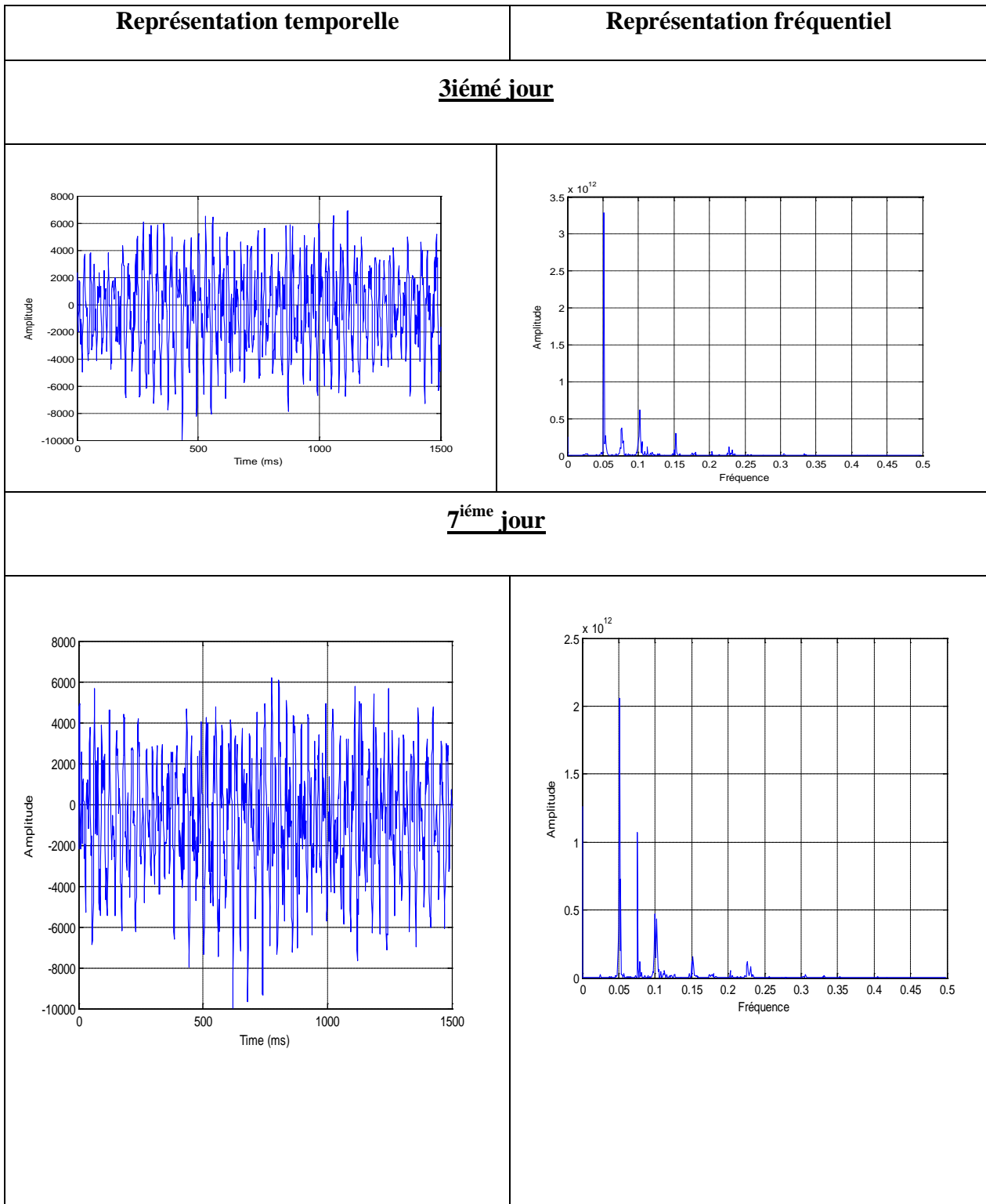
b. Les inconvénients

- spectres parfois difficile interpréter,
- dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses. [44]

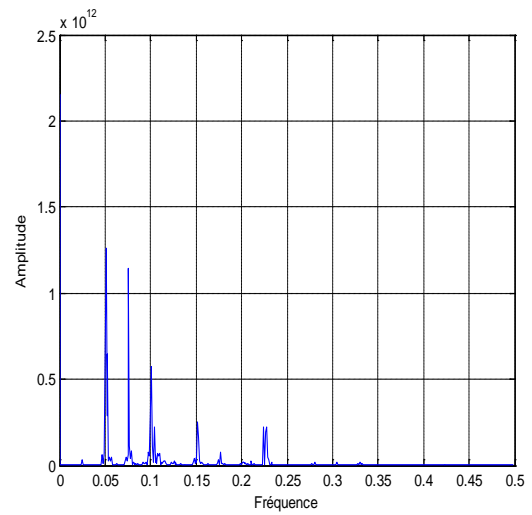
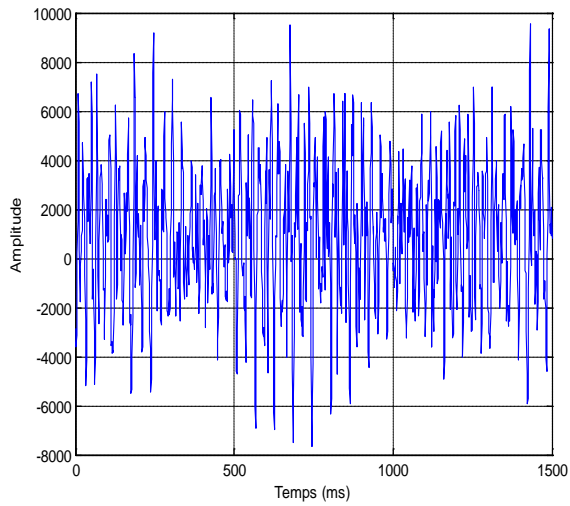
5. Résultat et discussion

5.1 Représentation temporelle et fréquentielle

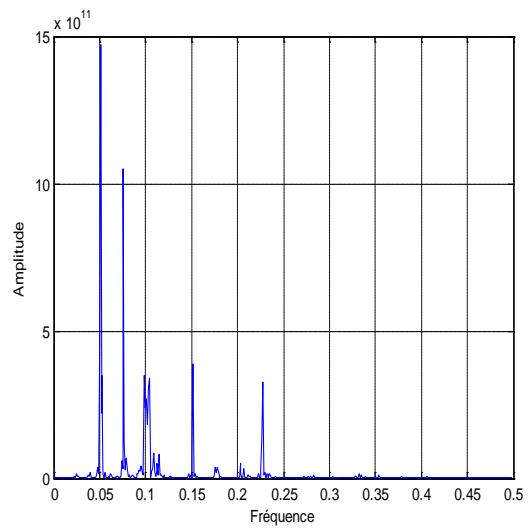
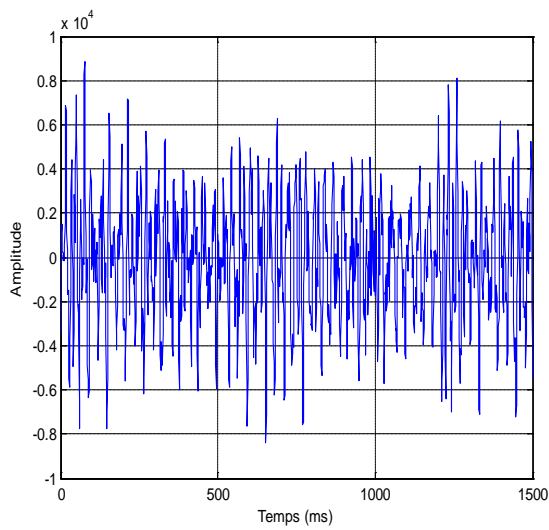
Nous avons donné la représentation temporelle et fréquentielle des jours : 3, 7,8, 9, 10, 11 et 12 ; c'est à dire quatre jours avant la détection de défaut et deux jours après, vu qu'on est arrivé à détecter le défaut au 10^{ème} jour.



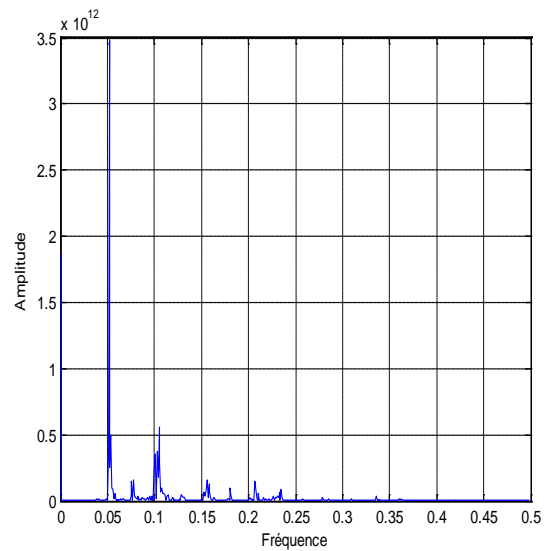
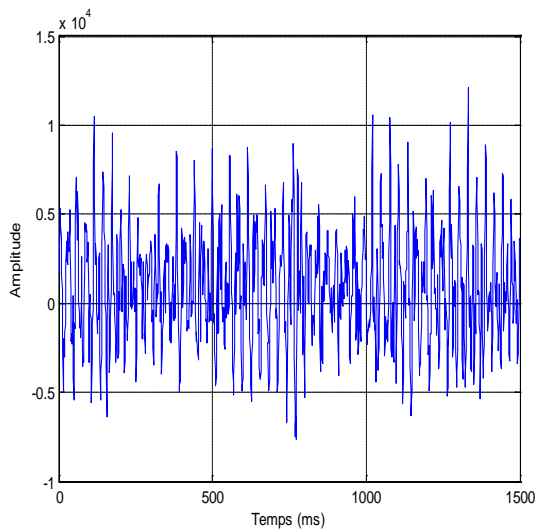
8^{ième} jour



9^{ième} jour



10^{ième} jour



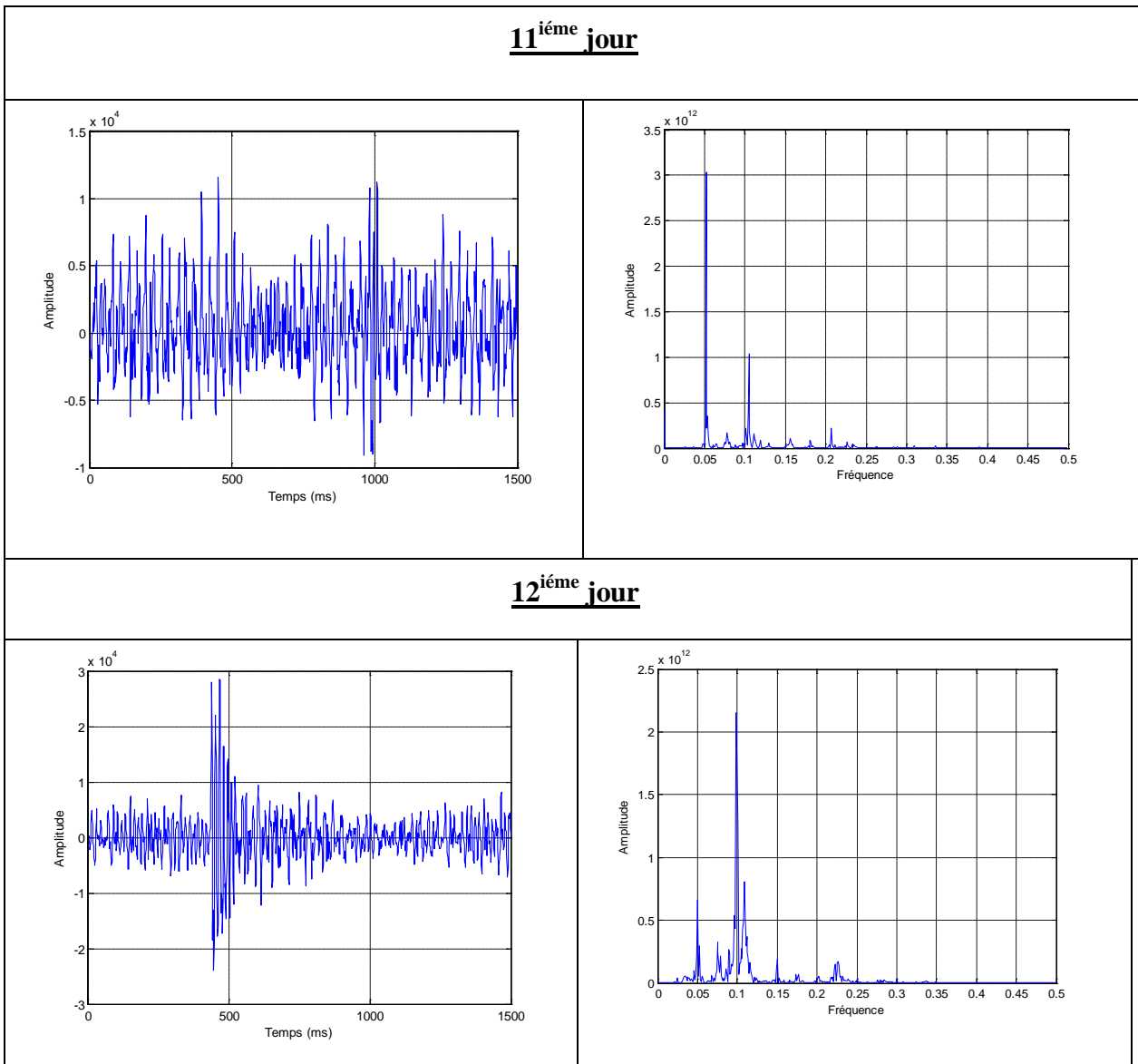


Fig.3.6:Les représentations temporelles des signaux vibratoires issus du réducteur de CETIM.

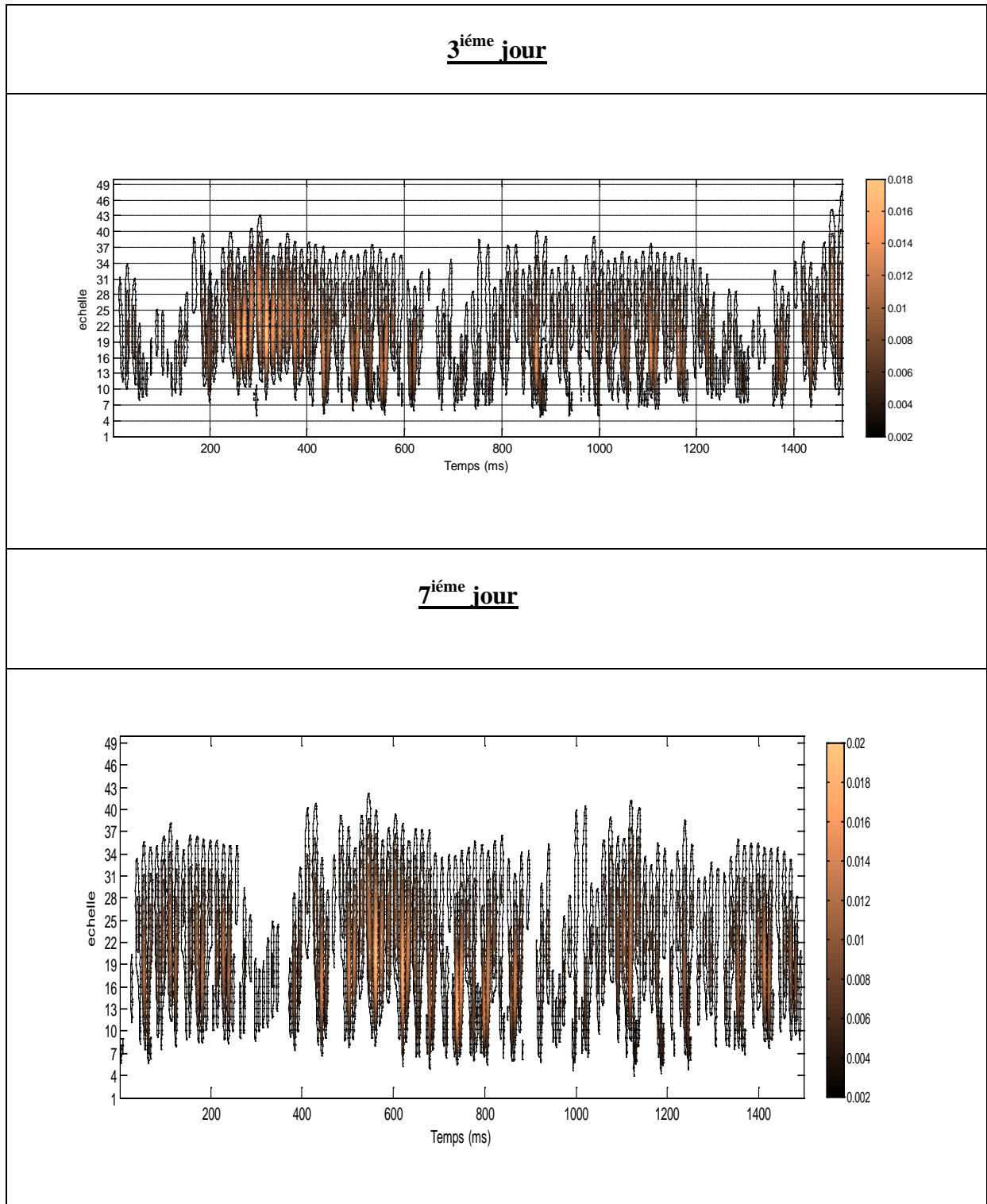
La représentation temporelle du signal vibratoire d'engrènement pendant les onze premiers jours ne donne aucun résultat caractérisant l'apparition d'un défaut.

- La représentation temporelle des signaux observés chaque jour présente des oscillations qui sont causés par l'engrènement et une modulation de Longue durée. Le signal vibratoire conserve cette forme jusqu'au 11^{ième} jour, par contre le 12^{ième} jour pendant lequel le défaut est supposé apparaitre ou l'écaillage selon le rapport d'expertise, nous remarquons une augmentation très élevée de l'amplitude du signal autour des modulations par rapport aux oscillations entre ces dernières.
- La représentation fréquentielle correspondant sont représentés sur la figure (3.6), les raies latérales sont très importantes au 12^{ième} jour par rapport aux autres jours et cette augmentation est due à la présence d'un défaut du à la détérioration d'une dent. donc la

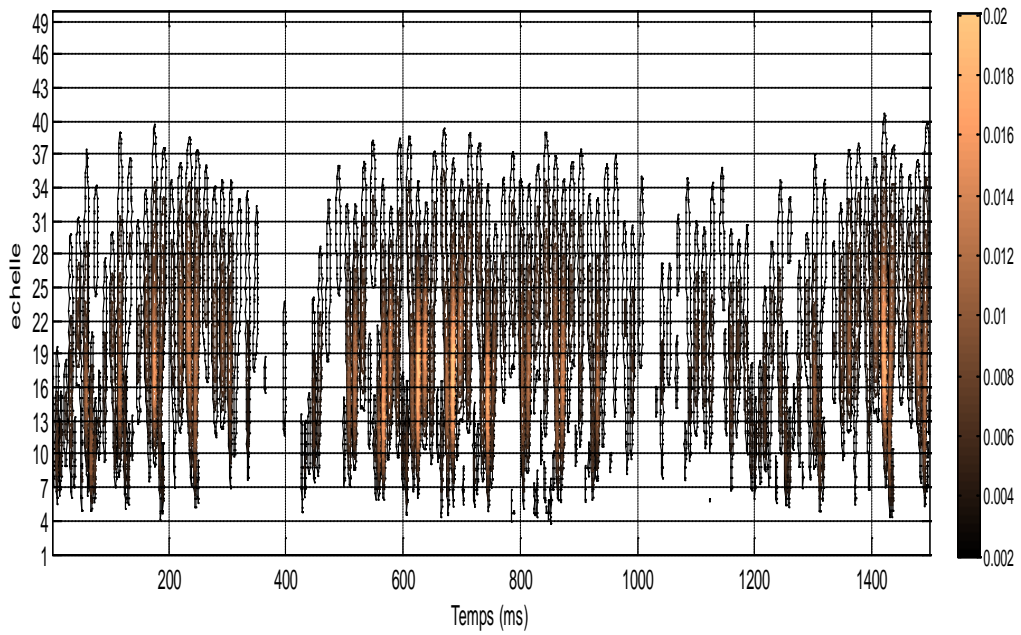
représentation temporelle et fréquentielle permettent de diagnostiquer un défaut au 12^{ième} jour.

5.2 Les scalogrammes obtenus par l'application de la transformée en ondelette de Symlet

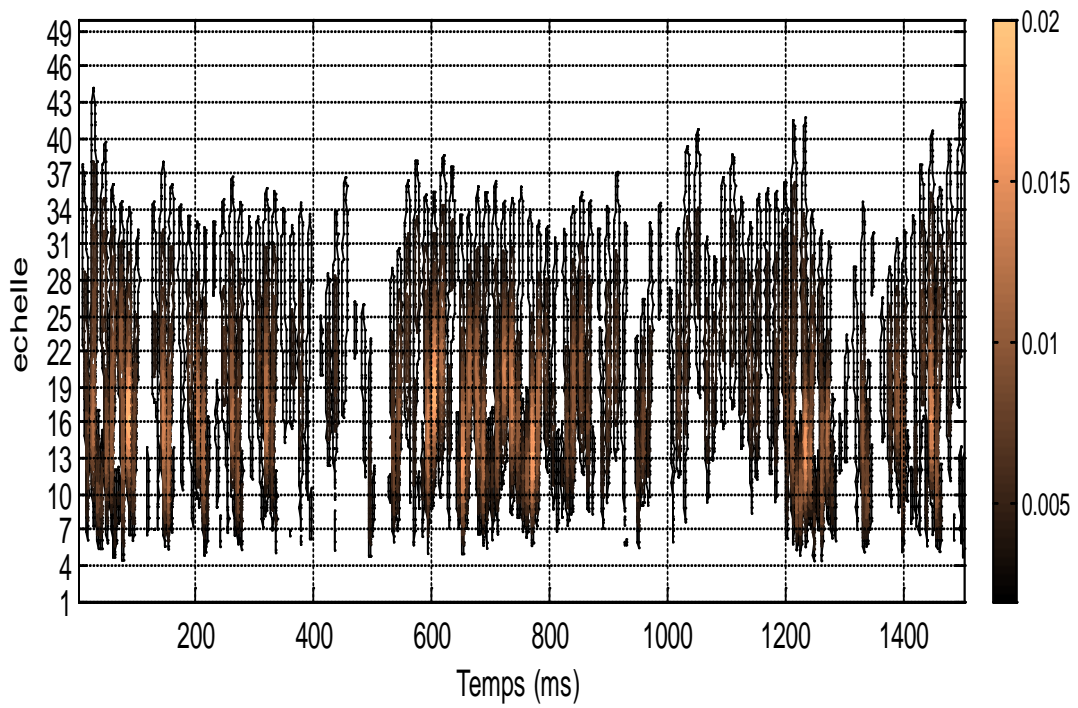
Les scalogrammes obtenus par l'application de la transformée en ondelette sur les signaux vibratoires issus du réducteur de CETIM est illustrés sur la figure 3.7.



8^{ième} jour



9^{ième} jour



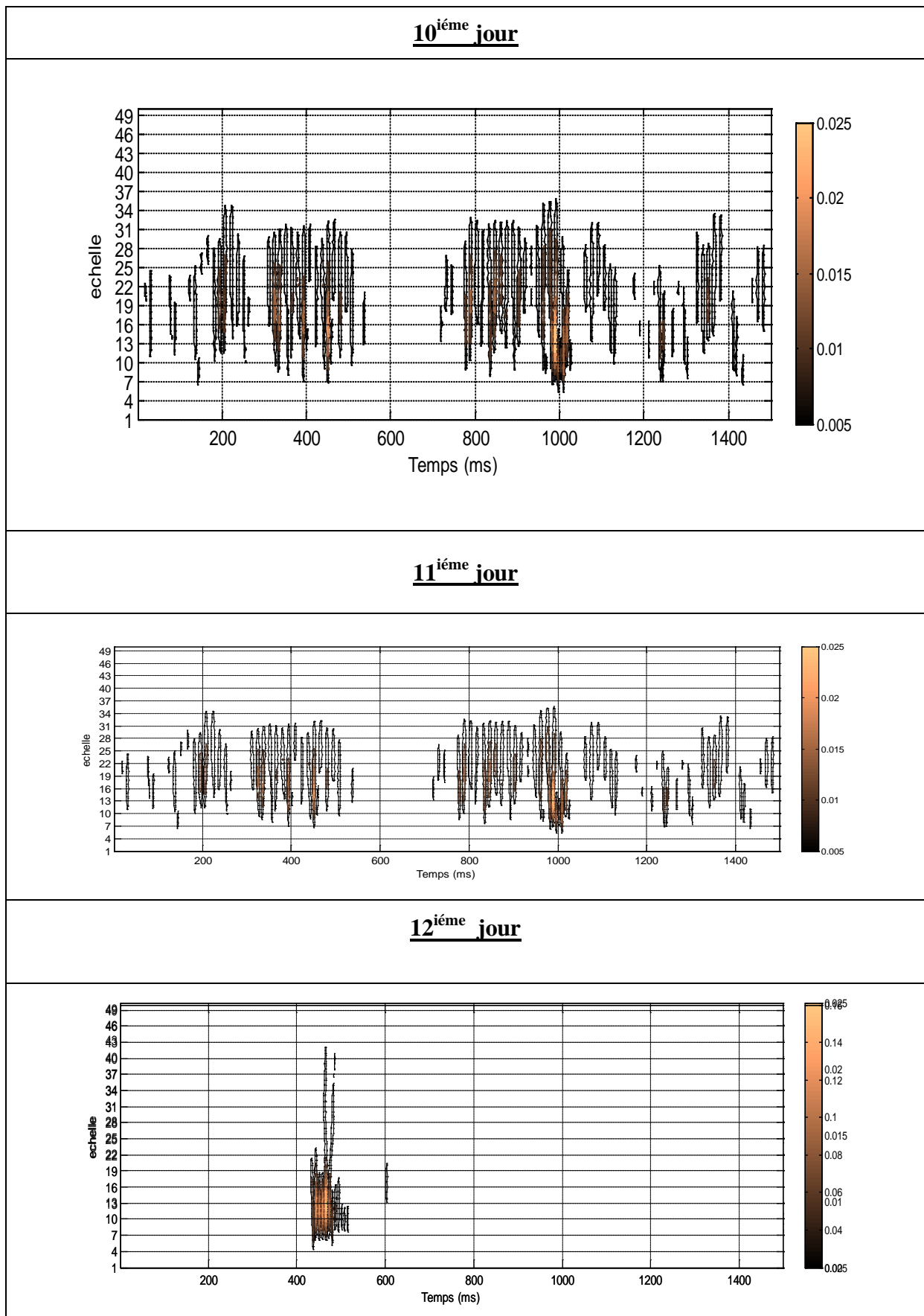


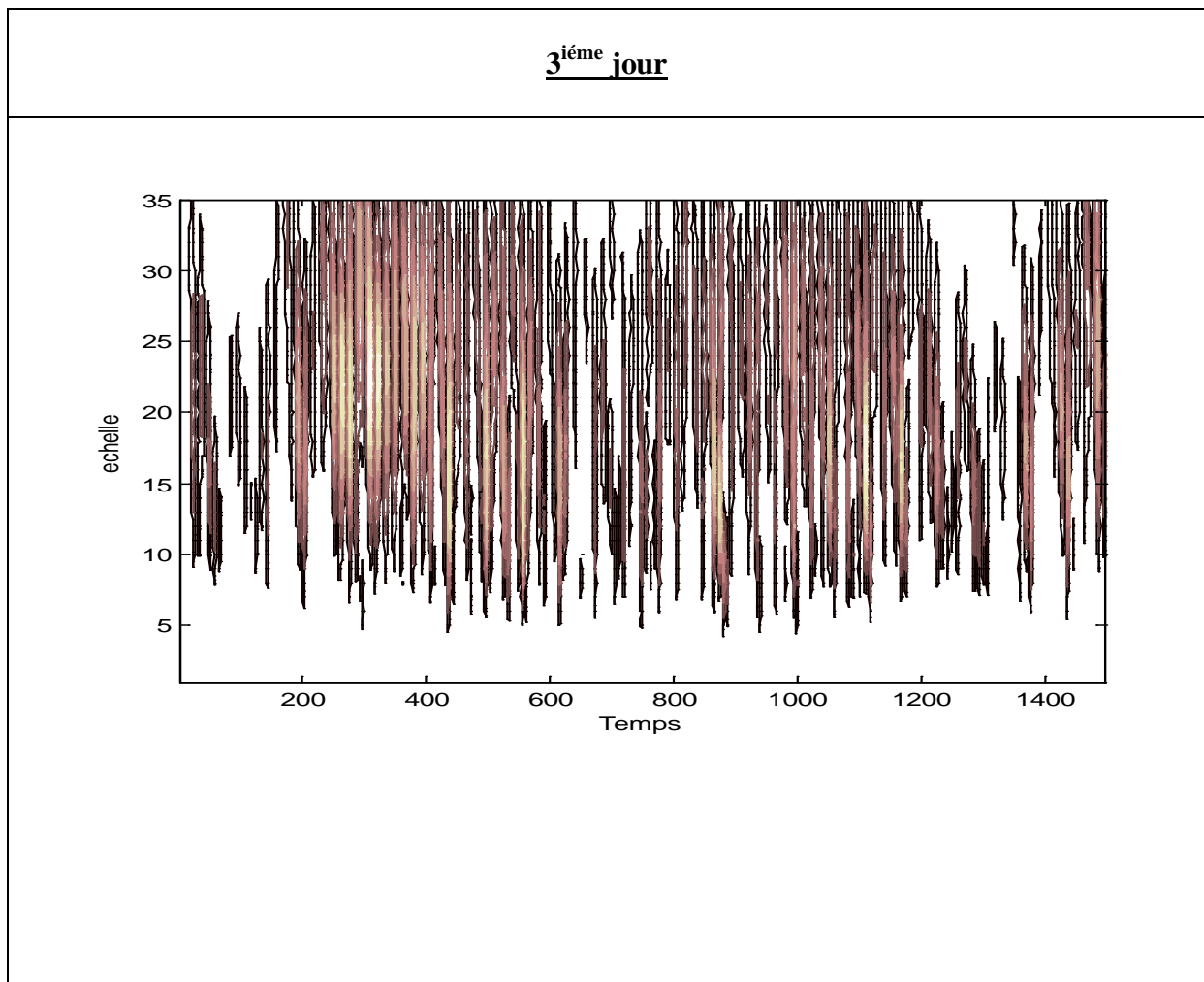
Fig.3.7 :Les scalogrammes obtenus par l'application de la transformée en ondelette de Symlet sur les signaux vibratoires issus du réducteur de CETIM.

Dans le domaine de la transformée en ondelettes, nous observons d'après la figure 3.7 que les coefficients sont stables et de même ordre de grandeur jusqu'au 9^{ième} jour avec un changement d'amplitude relativement faible des coefficients. 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 (Tableau 3.2), par l'écaillage de la dent 1/2 au 6^{ième} jour, début d'écaillage de la dent 15/16 au 8^{ième} jour et à l'évolution de l'écaillage de la dent 15/16 (le rapport d'expertise). Au 10^{ième} jour, on observe la disparition complète d'une partie des coefficients de la transformée en ondelettes. Cette disparition des coefficients est une signature précoce qui indique que le système d'engrenage va subir des défauts et ceci est dû à l'évolution de l'écaillage de la dent 15/16.

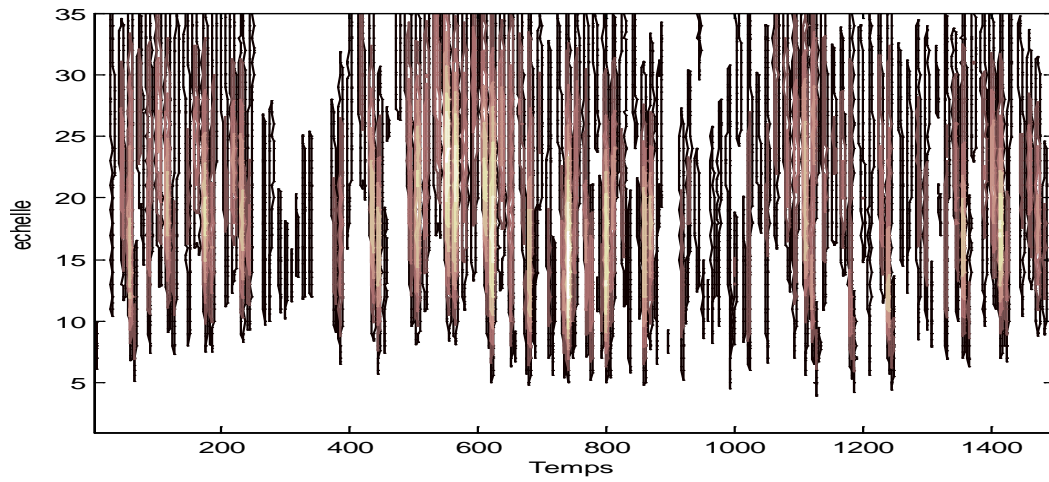
Le système d'engrenage présente un défaut (écaillage sur toute la largeur de la dent 15/16) au 12^{ième} jour qui se traduit par un changement complet de la localisation des coefficients de la transformée en ondelettes.

5.3 Les scalogrammes obtenus par l'application de la transformée en ondelette de Daubechies

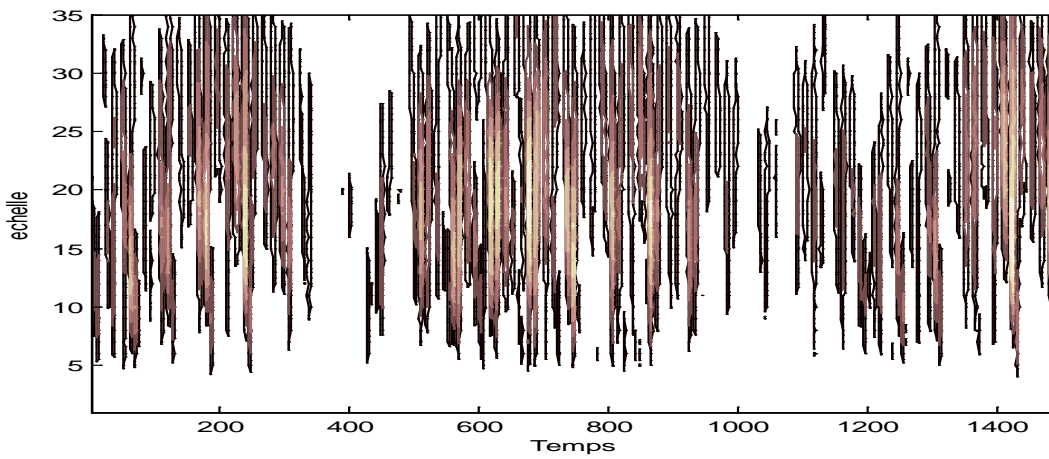
Les scalogrammes obtenus par l'application de la transformée en ondelette sur les signaux vibratoires issus du réducteur de CETIM est illustrés sur la figure 3.8.



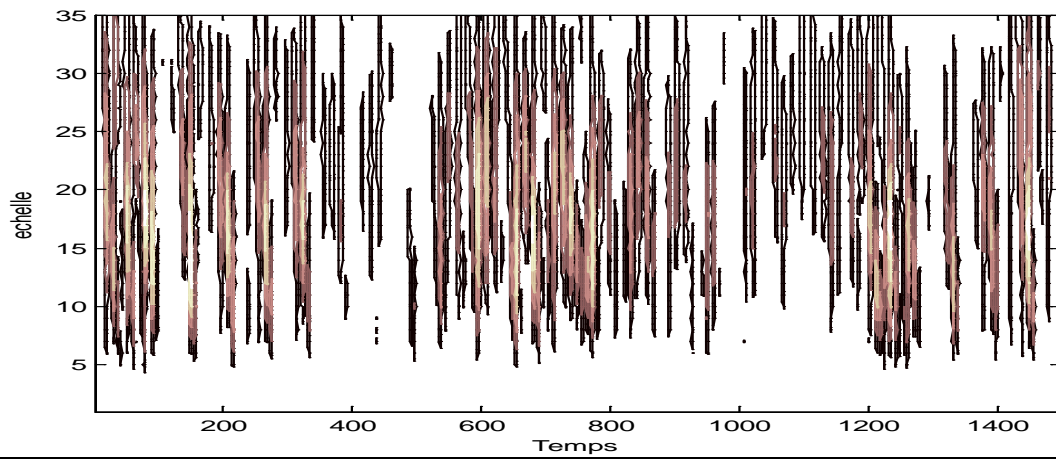
7^{ième} jour



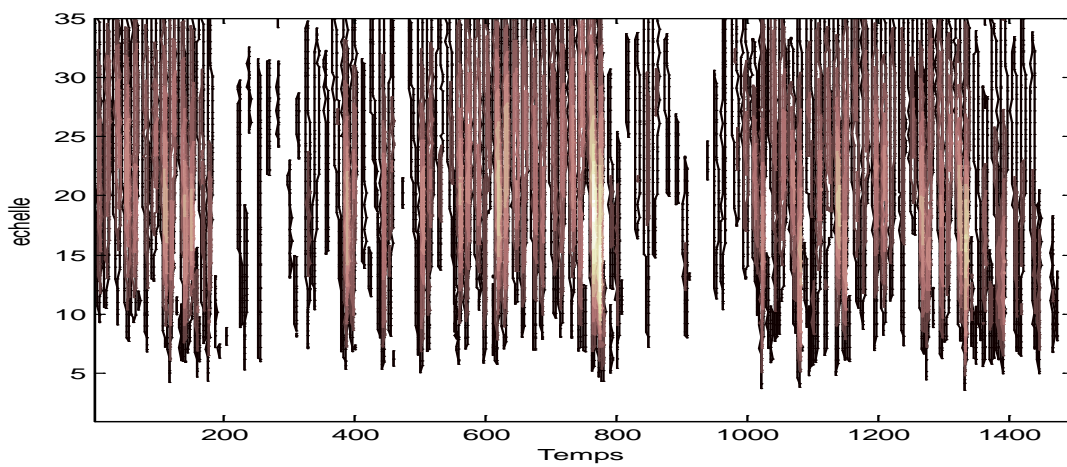
8^{ième} jour



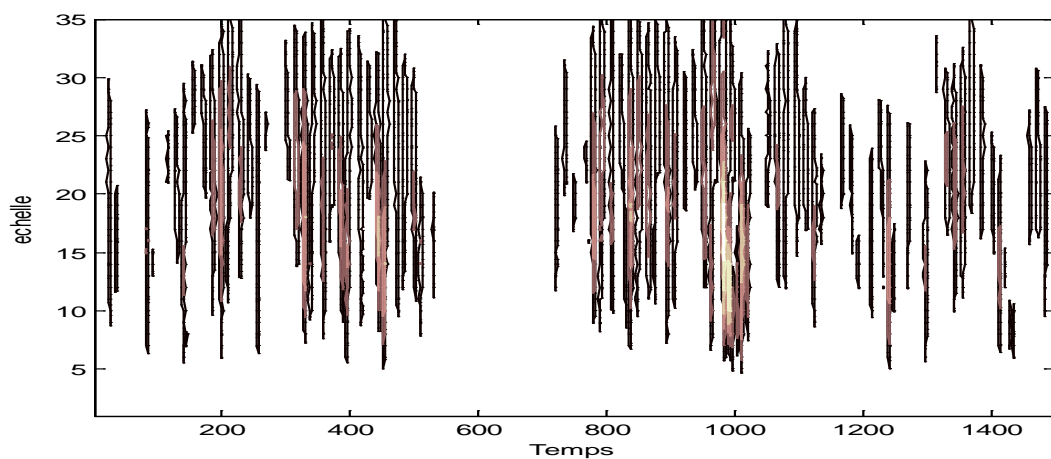
9^{ième} jour



10^{ième} jour



11^{ième} jour



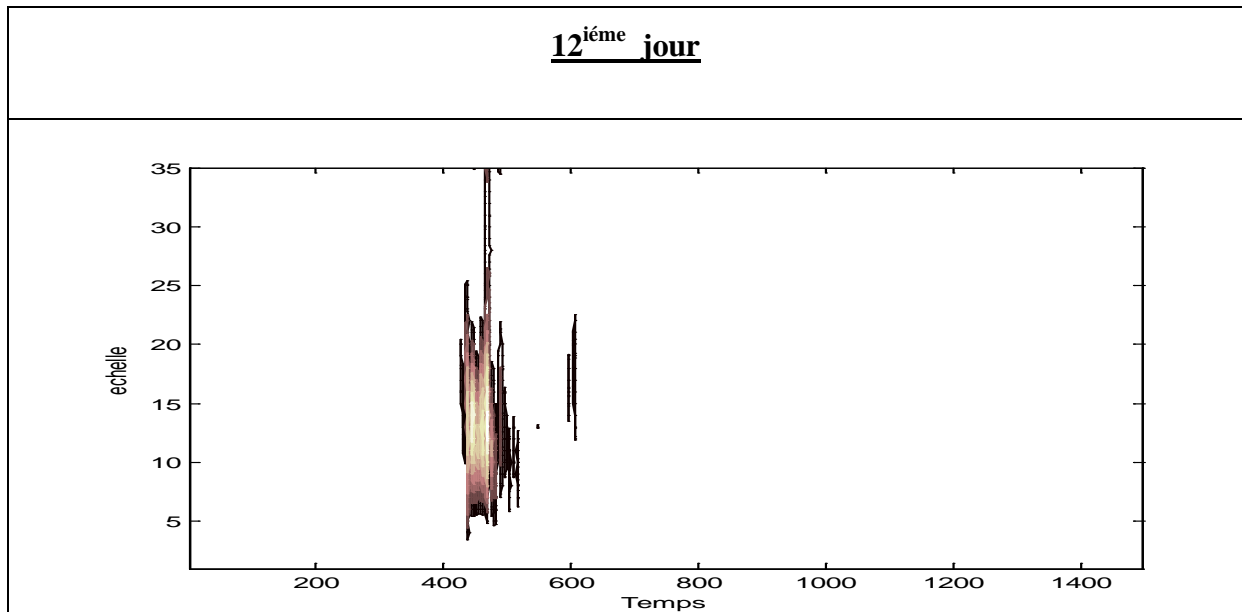


Fig.3.8 :Les scalogrammes obtenus par l'application de la transformée en ondelette de Daubechies sur les signaux vibratoires issus du réducteur de CETIM.

D'après la figure 3.8, si on applique la transformée en ondelette de Daubechies, on obtient des résultats similaires à celle de la transformée en ondelette de Symlet.

En effet, la transformée en ondelette de Symlet et Daubechies a bien réussi à détecter la présence précoce du défaut d'engrenage, au 10^{ième} jour avant l'écaillage visible.

6. Comparaison entre les différentes méthodes exposées

Les résultats de l'étude comparative des différentes méthodes d'analyse des vibrations pouvant être utilisées pour la détection et le diagnostic des défauts de roulement est présentée dans le tableau 3.3 :

Technique	Avantages	Inconvénients
L'analyse temporelle	Peut détecter le défaut	Son incapacité à déterminer la composante de roulements qui est défectueux
L'analyse spectrale	Peut détecter le défaut	Son incapacité à déterminer la composante de roulements qui est défectueux
Transformée en ondelette	Peut détecter le défaut	Il y a trois problèmes de l'analyse d'ondelettes, qui sont le choix approprié de l'ondelette mère, le choix de son niveau de décomposition et de sa bande de fréquence qui contiendrait les informations nécessaires à un diagnostic des défauts

Tab.3.3: l'Etude comparative des différentes méthodes de détection des défauts des engrenages.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons testé la performance de la transformée en ondelette sur des signaux réels d'un réducteur d'engrenages de CETIM. Les résultats obtenus ont mis en évidence la bonne performance et l'efficacité de cette approche pour la détection précoce de la présence d'un défaut d'engrenage.

Nous avons observé dans les scalogrammes obtenus que les coefficients sont stables et de même ordre de grandeur jusqu'au 9^{ième} jour avec un changement d'amplitude relativement faible des coefficients. Au 10^{ième} jour, nous avons remarqué une disparition complète d'une partie des coefficients de la transformée en ondelette. Cette disparition des coefficients est une signature précoce qui indique que le système d'engrenage va subir des défauts ; ce qui est dû à l'évolution de l'écaillage de la dent 15/16.



CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale :

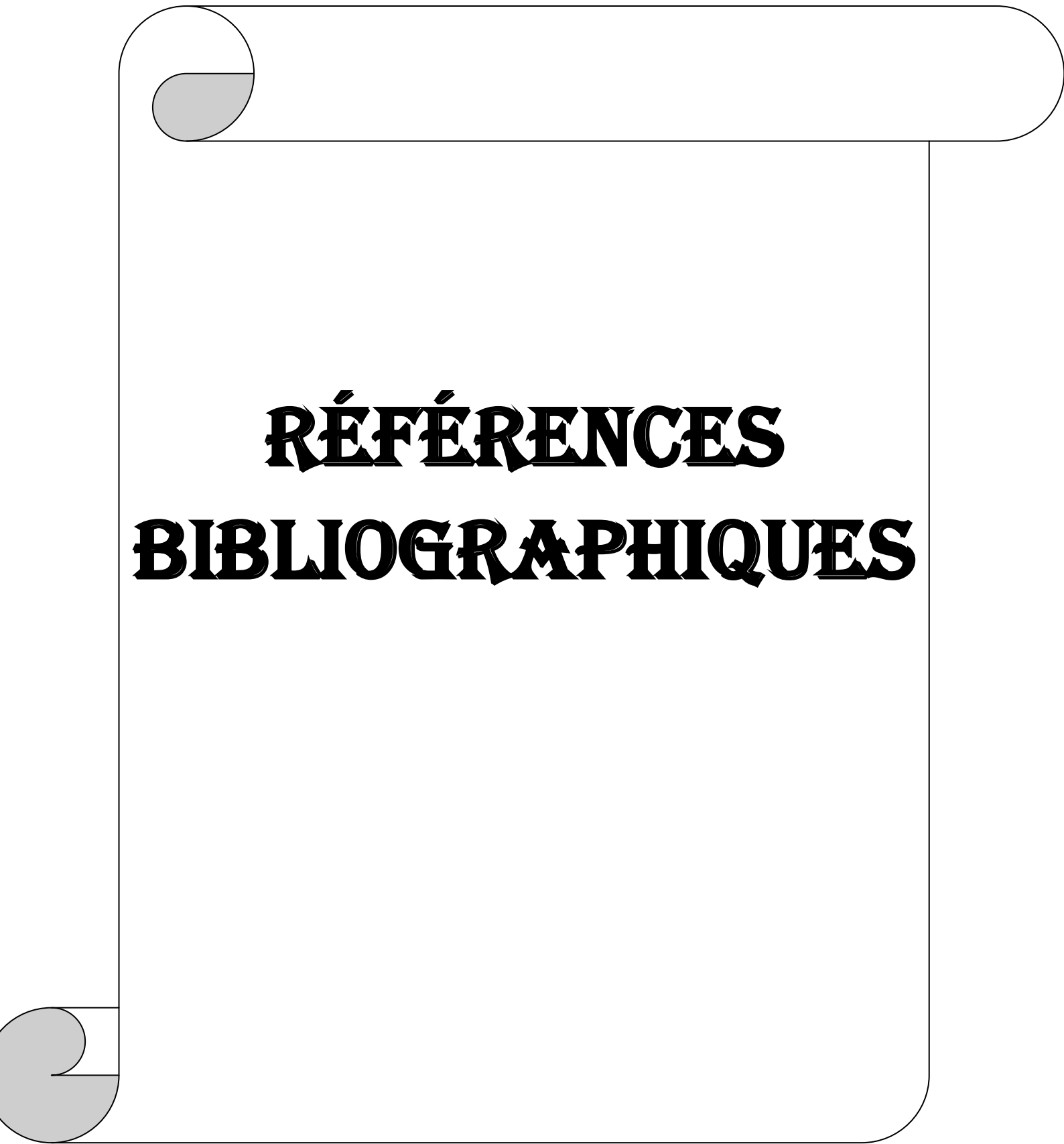
Plusieurs techniques avancées de traitement de signal ont été proposées dans la littérature. Chaque technique est basée sur un aspect théorique différent et les résultats obtenus sont généralement différents. Certaines techniques peuvent être plus convenables que d'autres. Parmi ces techniques on trouve la transformée de Fourier à fenêtre glissante, la transformée en ondelettes ...

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

Deuxièmement, nous avons testé la transformée en 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 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 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 des deux approches dans le cadre de la détection précoce de la présence d'un défaut d'engrenage.



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques :

- [1] 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.
- [2] I. Daubechies, "The wavelet Transform, Time-frequency Localisation and Analysis", IEEE, transactions on information theory. Vol. 36, pp. 961-1004, 1990.
- [3] Hbubard, B. B., Ondes et ondelettes : la saga d'un outil mathématique. Pour la science, 1995.
- [4] I. Daubechies, "Ten Lectures on Wavelets", Philadelphia Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992
- [5] Meyer, Y. Wavelets-algorithms and applications, volume 1. Society for Industrial and Applied Mathematics Translation, 1993.
- [6] Hassanpour, H. Parsaei, A. « Fetal ECG Extraction Using Wavelet Transform » In Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, and International Conference on Intelligent Agents; pp. 179-179; 2006
- [7] Gabor, D. « Theory of communication ». J. Inst. Elec. Eng., Vol. 93, N°. 3, pp. 429- 457, 1946
- [8] Flandrin, P. Temps-Fréquence, Edition Ellipse, 1994.
- [9] C.K. Sung, H.M. Tai, C.W. Chen, "Locating defects of a gear system by the technique of wavelet transform", Mechanism and Machine Theory, 35, pp. 1169-1182, 2000.
- [10] A. M. ATTO « Analyse en ondelettes et par paquets d'ondelettes de processus aléatoires stationnaires, et application à l'estimation non-paramétrique » Thèse de doctorat en Mathématiques et applications, Université de Bretagne, France, 2008.
- [11] Matlab Toolbox version 7.1,2009.
- [12] M. Chendeb. « Détection et classification des signaux non stationnaires par utilisation des ondelettes .Application aux signaux électromyographiques utérine ». Thèse de doctorat, Université de technologie de Troyes, 2006.
- [13] O. Soltani, « Restauration d'images satellites via la transformée en ondelette. Thèse de Magister, Département d'électronique, Université de Batna, 2011.
- [14] F. Truchetet. « Ondelette pour le signal numérique», Edition Hermes, Paris, 1998.

- [15] F.Truchetet. ondelette pour le signal numérique .Editions Hetmes, 1998.
- [16] Mallat, S. “A wavelet tour of signal processing”, Academic Press, second edition, 1998.
- [17] T.ABID, « Analyse du signal ECG par les ondelettes », Mémoire de Magister en Informatique, Université Badji Mokhtar Annaba, 2008.
- [18] 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
- [19] R.B. Randall, “A New Method of Modelling Gear Faults”, ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 104, No. 2, pp. 259-267,1982.
- [20] MAHGOUN 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.
- [21] 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.
- [22] A. Boulenger et C. Pachaud, Surveillance des machines par analyse des vibrations, Aide-mémoire, Dunod, Paris, 2009
- [23] 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
- [24] Ilyes Khelf, «Diagnostic Des Machines Tournantes Par Les Techniques De L’intelligence Artificielle», These De Doctorat, Universite Badj Mokhtar – Annaba (2014)
- [25] M .T. Nabti, « Etude de l’évolution des indicateurs spectraux et cepstraux dans la détection des défauts mécaniques ».Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas Setif (2011).
- [26] 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)

[27] Bdirina El khansa, « Diagnostic de défauts d'engrenage par l'analyse vibratoire » Thèse de Magistère en Génie électronique (2006).

[28] Antonia, J., 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

[29] Parey, A., El-Badaoui, M., Guillet, F., Tandon, N., “Dynamic modelling of spur gear pair and application of empirical mode decomposition-based statistical analysis for early detection of localized tooth defect”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 294, pp. 547–561, 2006

[30] Anand Parey, Ram Bilas Pachori, “Variable cosine windowing of intrinsic mode functions: Application to gear fault diagnosis”, *Measurement*, Vol. 45, pp. 415- 426, 2012

[31] 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.

[32] Anand Parey, Ram Bilas Pachori, “Variable cosine windowing of intrinsic mode functions: Application to gear fault diagnosis”, *Measurement*, Vol. 45, pp. 415- 426, 2012

[33] A .DJEHALA, “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.

[34] 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.

[35] Parey, A., El-Badaoui, M., Guillet, F., Tandon, N., “Dynamic modelling of spur gear pair and application of empirical mode decomposition-based statistical analysis for early detection of localized tooth defect”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 294, pp. 547–561, 2006

[36] Anand Parey, Ram Bilas Pachori, “Variable cosine windowing of intrinsic mode functions: Application to gear fault diagnosis”, *Measurement*, Vol. 45, pp. 415- 426, 2012

- [37] 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
- [38] A. Raad, Contributions aux statistiques cycliques d’ordre supérieur : applications au diagnostic des défauts d’engrenage, thèse de Doctorat, Université de Compiègne, 2003.
- [39] Mohamed EL Badaoui, Contribution au diagnostic vibratoire des réducteurs complexes à engrenages par l’analyse cepstrale, thèse de Doctorat, Université Jean Monnet, Roanne, 1999.
- [40] Dj. Chikouche, A. Felkaoui, N. Haloui, “Diagnostic precoce d’un reducteur 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, Algeria, pp. 219-224, 2010.
- [41] P .Konar , P .Chattopadhyay ,“Multi-class fault diagnosis of induction motor using Hilbert and Wavelet Transform”. Applied Soft Computing , Vol.30,pp. 341–345,2015
- [42] Landolsi Foued, «Cours De Techniques de Surveillance, Partie I Surveillance Des Machines Par Analyse Vibratoire».
- [43] 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).
- [44] ABA. A, « Diagnostic vibratoire sur des pompes rotatives EP2 & P112 ». Rapport de Fin de Mise en Situation Professionnelle du Technicien Supérieur en Mécanique Industrielle, Direction Regionale Haoud Berkaoui (2015).

Abstract:

Signal analysis is considered one of the main solutions used. The important information contained in the signals can be extracted. Time-frequency transforms such as the Wigner-Ville distribution and Short-Time Fourier Transform (STFT) can be used to analyze the vibratory signals. However, these techniques provide a constant resolution for all frequencies due to the same window used for the analysis of the entire signal. In order to overcome these disadvantages, the wavelet transform has been introduced. The aim of this work is to study the Wavelet Transform for the analysis of vibratory signals.

Keywords: TO, FFT, STFT, vibratory signals, gears

ملخص:

يعتبر تحليل الإشارة واحدة من الطرق الرئيسية التي يمكن من خلالها استخراج المعلومات الهامة الواردة في الإشارات. نستطيع استعمال تحويلات وقت-تردد، مثل تحويلة " Wigner-Ville " وتحويلة " STFT " لتحليل إشارات اهتزازية. غير أن هذه التحويلات توفر تحليل ثابت لجميع الترددات بسبب إستعمال نفس النافذة لتحليل الإشارة بأكملها. للتغلب على هذه العوائق، تم إدخال تحويلة الموجات " transformée en ondelette ". الهدف من هذه الدراسة هو دراسة تحويلة الموجات لتحليل إشارات اهتزازية.

الكلمات المفتاحية: تحويلة الموجات ، تحويلة فورييه، إشارات اهتزازية ، التروس.

Résumé :

L'analyse du signal est considérée comme l'un des principaux moyens utilisés. Les informations importantes contenues dans les signaux peuvent être extraites. On peut utiliser des transformées temps-fréquence, tels que la distribution de Wigner-Ville et la transformée de Fourier à courte durée (Short Time Fourier Transform STFT) pour analyser les signaux vibratoires. Cependant, ces techniques fournissent une résolution constante pour toutes les fréquences due à la même fenêtre utilisée pour l'analyse de la totalité du signal. Afin de dépasser ces inconvénients, la transformée en ondelette a été introduite. L'objectif de ce travail est d'étudier la Transformée en Ondelette pour l'analyse des signaux vibratoires.

Mots clés : TO, FFT, STFT, signaux vibratoires, les engrenages.