

Application de la transformée en ondelette à l'analyse des signaux vibratoires d'un système d'engrenage en vue d'un diagnostic précoce

Mr. AYAD Mouloud, Prof. CHIKOUCHE Djamel
 Université FERHAT Abbas Sétif- Algérie
 Ayad_moul@yahoo.fr, dj_chikou@yahoo.fr

Résumé- La détection précoce des endommagements des dentures d'engrenages fonctionnant à faible vitesse fait l'objet de plusieurs études. Cet article propose une application de l'outil de la transformée en ondelettes à l'analyse des signaux vibratoires issus d'un système d'engrenages afin de déceler la présence des défauts. Après avoir rappelé les propriétés de la transformée en ondelette, nous définissons l'algorithme utilisé qui est l'algorithme de Morlet. Nous montrons que la surveillance et le diagnostic du système étudié peuvent s'effectuer à travers l'observation des variations des harmoniques de la fréquence d'engrènement durant 13 jours d'observation de la machine.

Mots clés- transformée en ondelettes, analyse temps-fréquence, temps-échelle, système d'engrenage, défauts précoce d'engrenage

I. INTRODUCTION

Les transformations linéaires ont toujours joué un très grand rôle en traitement du signal, et parmi ces dernières, la plus anciennement étudiée est la transformation de Fourier (1822) [1-3]. Cette transformation permet d'explorer la composition fréquentielle du signal. Très tôt dans l'histoire du traitement du signal, il s'est avéré que la décomposition obtenue par Fourier n'était pas toujours la plus satisfaisante. Aux années 1940, Gabor découvrait la première forme de la représentation temps-fréquence. Sa technique consiste à découper le signal en différentes plages de longueur fixée ou fenêtre [4-6]. Chaque segment du signal limité par une fenêtre est étudié séparément des autres par l'analyse de Fourier. L'ensemble de ces transformées localisées forme la transformée de Gabor du signal. L'inconvénient majeur de ce procédé est que la longueur de la fenêtre étant fixée, il n'est pas possible d'analyser simultanément des phénomènes dont les échelles de temps sont différentes. Une autre technique d'analyse qui ne privilégie aucune échelle particulière mais qui généralise à toutes les échelles l'analyse locale des fréquences obtenues par la méthode de Gabor devient plus que nécessaire [1, 4, 5]. En 1982, J.Morlet ouvre la voie conduisant à la solution en construisant l'analyse en ondelettes, fondée sur un concept quelque peu différent de celui de fréquence: le concept d'échelle [2,7-9]. Cette procédure développée par Stéphane Mallat et systématisée par Ingrid Daubechies, porte le nom de multi-résolution et suggère une interprétation différente de l'analyse par ondelettes [4-7,10]. Les ondelettes constituent donc un outil parmi les plus récents du traitement du signal et

qui datent de quelques décennies seulement [4]. Elles nous permettent d'effectuer une analyse robuste et mènent à une multitude d'applications. Contrairement à la transformée de Fourier à court terme, la transformée en ondelettes fait appel à la notion de temps-échelle impliquant des fenêtres d'analyse de longueurs dynamiques [5].

L'objectif de cet article est l'application de l'outil de la transformée en ondelette pour l'analyse des signaux vibratoires issus d'un système d'engrenages afin de déceler d'une manière précoce la présence de défauts.

II. DEFINITION

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 $\varepsilon > 0$,

$$\begin{aligned} |t|^{\frac{1}{2}+\varepsilon} \psi &\in L^2 \\ |f|^\varepsilon \widehat{\psi} &\in L^2 \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt &= 0 \end{aligned}$$

Où $\widehat{\psi}$ est la transformée de Fourier de ψ .

Du point de vue mathématique, les ondelettes sont des fonctions élémentaires sur lesquelles on va décomposer le signal $x(t)$. Ces fonctions vont permettre une analyse temps-fréquence. On peut également les introduire à partir d'une seule fonction $\psi(t)$ appelée ondelette analysante (ou mère); ensuite, on construit [4,5,7-12] les ondelettes $\psi_{a,b}(t)$ par dilatation et par translation:

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

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

A partir de l'ondelette mère $\psi(t)$ vont se déduire toutes les fonctions $\psi_{ab}(t)$ de la famille d'ondelettes, le paramètre (b) positionne l'ondelette sur l'axe du temps, alors que le paramètre (a) contrôle la fréquence de l'ondelette (contraction: haute fréquence, dilatation: basse fréquence).

Si $|\alpha| \ll 1$, l'ondelette $\psi_{ab}(t)$ devient très concentrée de l'ondelette mère $\psi(t)$ et le contenu fréquentiel penchera vers les hautes fréquences du plan d'analyse.

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

Si on fait varier le paramètre de dilatation (a), l'ondelette conserve le même nombre d'oscillations [5].

II.1. TRANSFORMÉE EN ONDELETTE CONTINUE TOC

Soit une fonction ψ appartenant à $L^2(R)$ et $TF(\psi)$ sa transformée de Fourier qui satisfait la condition d'admissibilité [2,11] :

$$C = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|TF[\psi(t)]|^2}{f} df < \infty \quad (2)$$

Alors ψ est appelé ondelette mère; et on appelle transformée en ondelette la transformation intégrale qui à toute fonction x appartenant à $L^2(R)$ fait correspondre la fonction $TO_x(a,b)$ définie par [6] :

$$TO_x(a,b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3)$$

Avec $b \in R$; $a \in R - \{0\}$.

La transformée en ondelettes peut alors être exprimée sous forme d'un produit scalaire [6, 7]:

$$TO_x(a,b) = \langle \psi_{a,b}, x \rangle \quad (4)$$

II.2. TRANSFORMÉE EN ONDELETTES DISCRETE TOD

Pour des raisons d'applications, et en vue de la discrétisation, on prend les valeurs du coefficient (a) positives. Comme on le fait aussi souvent en théorie du signal, on supposera que les fréquences (f) sont aussi positives.

Nous voulons restreindre les coefficients (a) et (b) à des valeurs discrètes; nous choisissons pour cela un pas de dilatation ($a_0 > 1$) et un pas de translation ($b_0 > 0$), [2], avec:

$$\begin{aligned} a &= a_0^m \\ b &= nb_0 a_0^m \quad m, n \in Z \end{aligned}$$

Le paramètre de translation dépend du taux de dilatation.

A partir de l'ondelette admissible:

$$\psi_{a,b}(t) = a^{-1/2} \psi(a^{-1}t - a^{-1}b) \quad (5)$$

On obtient la famille d'ondelettes traduites et dilatées discrètes suivante :

$$\psi_{m,n}(t) = a_0^{-m/2} \psi(a_0^{-m}t - nb_0) \quad (6)$$

La transformée en ondelettes discrète est donnée par:

$$TOD_x(m,n) = a_0^{-m/2} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(k) \psi(a_0^{-m}k - nb_0) \quad (7)$$

Dans l'espace temps-fréquence [2, 5], le réseau discret est donnée par :

$$(t, f) = \left(n b_0 a_0^m, a_0^{-m} f_0 \right) \quad (8)$$

III. ALGORITHME DE MORLET

L'ondelette de Morlet est définie comme suit:

$$\psi(t) = \exp(jct) \exp\left(-\left(\frac{\alpha^2 t^2}{2}\right)\right) \quad (9)$$

Les gaussiennes sont numériquement [2] très bien localisées en temps et en fréquence. Avec $c=5$; $\alpha=1$. (Pour que la valeur moyenne se rapproche de zéro).

Donc:

$$\psi(t) = \exp(j5t) \exp(-t^2/2) \quad (10)$$

$$\psi(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) [\cos(5t) + j \sin(5t)] \quad (11)$$

$$\psi(t) = \psi_r(t) + j \psi_{im}(t) \quad (12)$$

La transformation intégrale qui à toute fonction x appartenant à $L^2(R)$ fait correspondre la fonction $TO_x(a,b)$ définie [6,13,15] par:

$$TO_x(a,b) = 2^{-m/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi \left(2^{-m}t - n \right) dt \quad (13)$$

Avec $b \in R$; $a \in R - \{0\}$.

L'algorithme de Morlet a été déduit sur la base de l'expression (13).

Les résultats obtenus dans cet article sont basés sur l'algorithme de Morlet.

IV. DETECTION PRECOCE DU DEFAUT D'UN SYSTEME D'ENGRENAGES

Les engrenages sont les éléments de machines les plus utilisées dans la construction mécanique. Le rôle des engrenages est de transmettre un mouvement ou une puissance entre deux arbres, avec un rapport de vitesse constant. Les matériaux utilisés varient en fonction des utilisations, mais les plus couramment employés sont l'acier et la fonte. Les matériaux plastiques sont toutefois de plus en plus employés pour transmettre une faible puissance.

IV.1. DISPOSITIF D'ENREGISTREMENT

Les tests ont été effectués sur un système d'engrenages composé de deux roues comportant respectivement 20 et 21 dents. Ce système fonctionne 24h/24h sous des conditions fixes. Les fréquences de rotation f des deux roues sont de l'ordre de 16.67 Hz et la fréquence d'engrènement f_e est de l'ordre de 330 Hz.

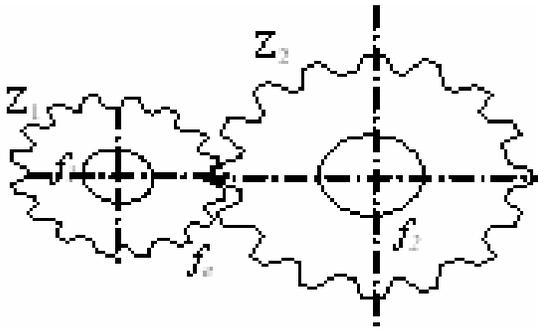


Fig. 1. Système d'engrenage

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.

$$f_e = Z_1 \cdot f_1 = Z_2 \cdot f_2 \quad (14)$$

Avec : f_1 : La fréquence de rotation de la roue 1

f_2 : La fréquence de rotation de la roue 2

Z_1 : Nombre de dents de la roue 1.

Z_2 : Nombre de dents de la roue 2.

Les enregistrements sont effectués chaque jour pendant 13 jours. Un signal vibratoire issu du banc d'essai comportant 60160 échantillons avec une fréquence d'échantillonnage de 20 KHz.

L'une des dents d'une roue d'engrenages a été détériorée au cours de l'expérimentation.

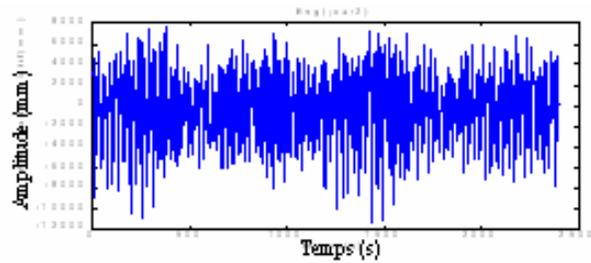
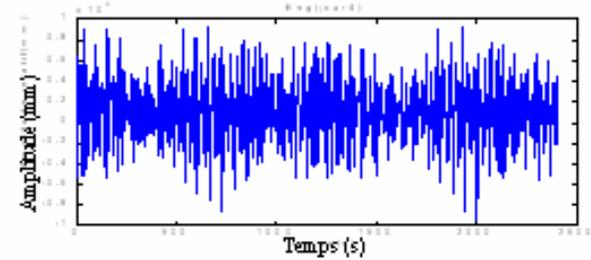
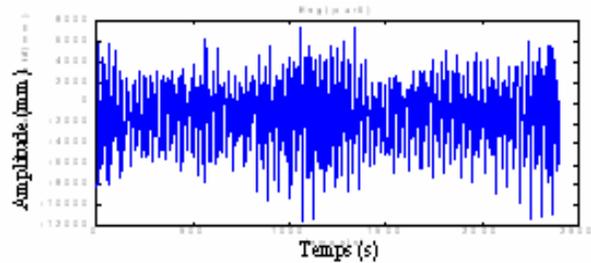
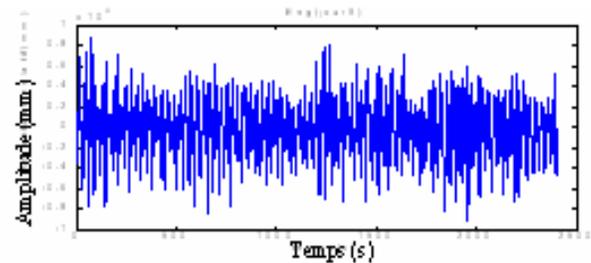
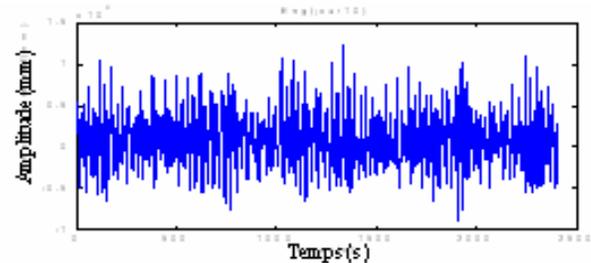
Les signaux d'engrènement avec lesquels nous avons travaillé ont été fournis à plusieurs laboratoires en France par CETIM.

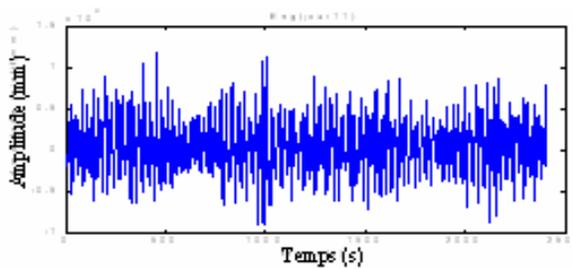
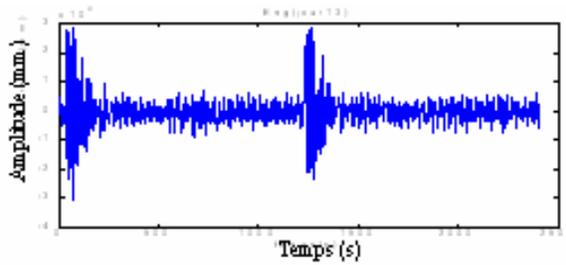
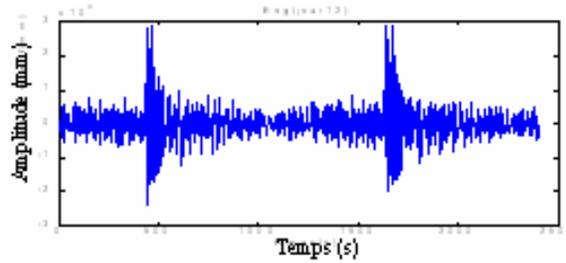
IV.2. PRESENTATION DES DONNEES ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Vu le grand nombre de données (60160 échantillons), il est difficile de les traiter toutes. 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 $f = 16.67 \text{ Hz}$ et $f_{\text{éch}} = 20 \text{ KHz}$. Pour calculer le nombre d'échantillons couvrant une période, on divise la période de rotation T sur la période d'échantillonnage $T_{\text{éch}}$. Le nombre d'échantillons obtenu sera 1200 échantillons. On choisit donc un nombre de 1500 échantillons.

IV.2.1. REPRESENTATION TEMPORELLE

Les représentations temporelles du signal émis par le système pour chaque jour sont données sur les "Fig. 2," à "Fig.9,".

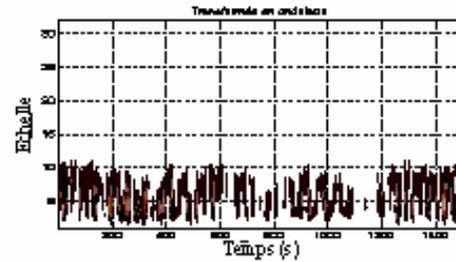
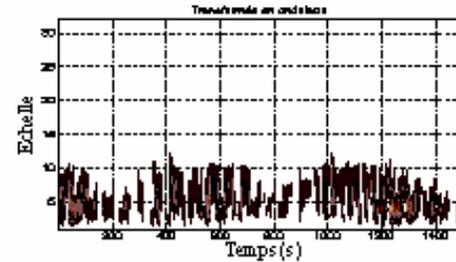
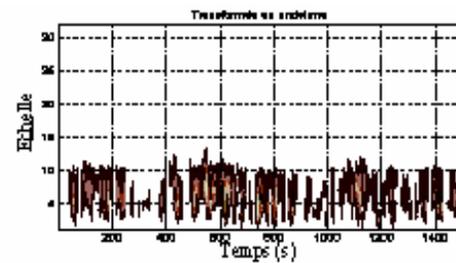
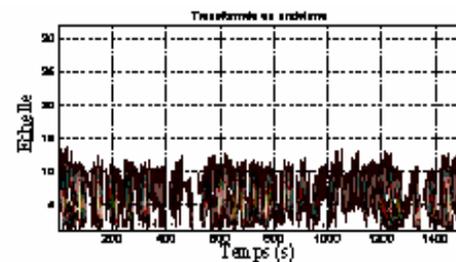
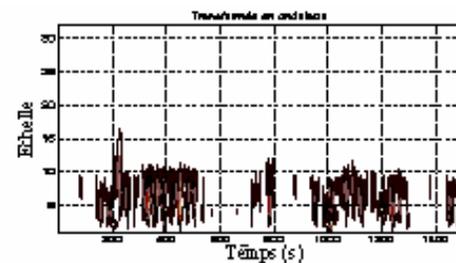
Fig. 2. Signal du 2^{ème} jourFig. 3. Signal du 4^{ème} jourFig. 4. Signal du 6^{ème} jourFig. 5. Signal du 9^{ème} jourFig. 6. Signal du 10^{ème} jour

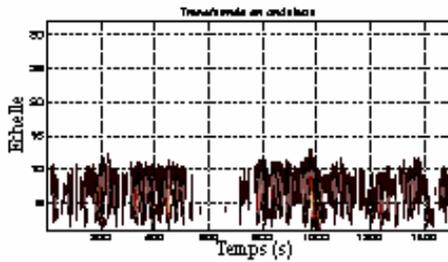
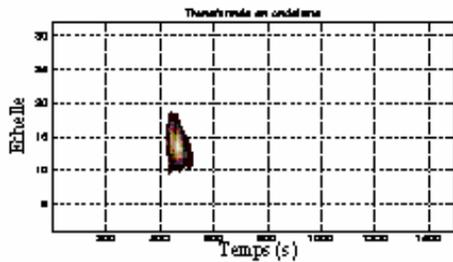
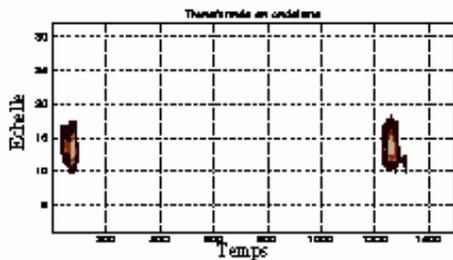
Fig. 7. Signal du 11^{ème} jourFig. 8. Signal du 12^{ème} jourFig. 9. Signal du 13^{ème} jour

Nous remarquons que pendant les onze premiers jours, la représentation temporelle du signal vibratoire d'engrènement ne donne aucun indice supplémentaire caractérisant l'apparition d'un défaut, par contre le douzième et le dernier jour présentent des représentations différentes qui sont les indicateurs de la présence d'un défaut (une phénomène de battement) dû à la détérioration d'une dent.

IV.2.2. REPRESENTATION TEMPS- ECHELLE DU SIGNAL VIBRATOIRE

La représentation temps-échelle est le but de notre application. C'est une représentation utilisée pour détecter le défaut d'engrenages dans le plan temps – échelle et essayer de l'identifier. Les scalogrammes obtenus par la transformée en ondelettes, appliqués au signal vibratoire émis par le système d'engrenages pendant les 13 jours d'expérimentation du banc d'essai, sont représentés sur les figures 10-17. L'algorithme de Morlet [1,2] a été utilisé pour ses bonnes performances.

Fig. 10. TO du signal du 2^{ème} jourFig. 11. TO du signal du 5^{ème} jourFig. 12. TO du signal du 7^{ème} jourFig. 13. TO du signal du 9^{ème} jourFig. 14. TO du signal du 10^{ème} jour

Fig. 15. TO du signal du 11^{ème} jourFig. 16. TO du signal du 12^{ème} jourFig. 17. TO du signal du 13^{ème} jour

Dans le domaine de la transformée en ondelettes, les coefficients sont stables et de même ordre de grandeur jusqu'au 9^{ème} jour. Au 10^{ème} jour, les coefficients commencent à changer leurs régimes (absence d'une partie de la bande sur le scalogramme) "Fig. 14, ". C'est un indice précoce qui indique que le système d'engrenage va subir des défauts. Le système d'engrenage présente un défaut au 12^{ème} jour qui se traduit par un changement complet de la localisation des coefficients de la transformée en ondelettes "Fig. 16, " et "Fig. 17, ".

V. CONCLUSION

L'objectif de cet article consistait à détecter la rupture d'un signal vibratoire issu d'un système d'engrenages en vue de la détection précoce de ses défauts. L'application de la transformée en ondelettes aux signaux vibratoires a révélé que les scalogrammes obtenus sont stables du premier au 9^{ème} jour et qu'au 10^{ème} jour, une partie de la bande des coefficients a disparu. Ce qui permet une détection précoce du défaut d'engrenages avant sa manifestation au 12^{ème} jour. En

conséquence, la transformée en ondelettes peut être utilisée dans le diagnostic précoce des systèmes d'engrenages.

REFERENCES

- [1] T. Frederic, Ondelette pour le signal numérique, éd. HERMES, Paris, 1998.
- [2] : P. Flandrin, Temps-Fréquence, éd. HERMES, Paris, 1993.
- [3] : A. Ouahabi, Techniques avancées de traitement du signal et applications, Alger, 1993.
- [4] C. Gasquet, P. Witomski, Analyse de Fourier et application: Filtrage, Calcul numérique et Ondelette, éd Dunod, Paris 2000.
- [5] I. Daubechies, "The wavelet Transform, Time-frequency Localisation and Analysis," IEEE transactions on information theory, Vol. 36, pp. 961-1004, 1990.
- [6] S. Mallat, "Multifrequency channel decomposition of images and wavelet models", IEEE Trans, On Acoustic Speech and Signal Proc, Vol. 37, N°. 12, pp. 2091-2110, Decembre 1989.
- [7] S. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation," IEEE Pattern Anal and Machine Intell., vol. 11, N°. 7, pp. 674-693, 1989.
- [8] A. Munoz, R. Ertlé, M.Unser, "Continuous wavelet transform with arbitrary scales and O(N) complexity," Signal Processing. 82 , pp. 749-757, 2002.
- [9] O. ÖZGÖNENEL, G. ÖNBILGIN, C. KOCAMAN, "Transformer Protection Using the Wavelet Transform," TÜBITAK, Turk J Elec Engin, VOL.13, N°.1, pp.119-135, 2005.
- [10] M. Chabert, J. Y. Tourneret, and F. Castanie, "Time-scale analysis of abrupt changes corrupted by multiplicative noise," Signal Processing. 80 , pp 397-411, 2000.
- [11] A. Maria, T. J. Lopez, L. E. ZAPATA, "A Configurable Architecture for the Wavelet Packet Transform," Journal of VLSI signal Processing. 32, pp. 255-273, 2002.
- [12] P. Vanderghenst, J.F. Gobbers, "Directional Dyadic Wavelet Transforms: Design and Algorithms," IEEE transactions on image processing, Vol.11, N°. 4, pp.363-372, April 2002.
- [13] P. Thulasiraman, A.A. Khokhar, G. Heber, and G.R Gao, "A fine-grain load-adaptive algorithm of the 2D discrete wavlet transform for multithreaded architectures," J. Parallel Distrib. Comput. 64, pp. 68-78, 2004.
- [14] M. Ali. Al-haj, "Fast discrete wavelet transformation using FPGAs and distributed arithmetic," International Journal of applied science and engineering, pp. 160-171, 2003.
- [15] K.C.Ho, W.Prokopiw, and Y. T. Chan, "Modulation identification of digital signals by the wavelet transform," IEEE processing Radar Sonar Navig, Vol 147, N°. 4, pp. 169-176, 2000.