

**CARACTÉRISATION ET DÉTECTION DE DÉFAUTS DANS LES
MATÉRIAUX À FORT BRUIT DE STRUCTURE PAR ANALYSE EN
ONDELETTES, APPLICATION AU CONTRÔLE NON DESTRUCTIF
DES ACIERS INOXYDABLES AUSTÉNITIQUES**
*STRUCTURAL NOISE CHARACTERIZATION AND FLAW DETECTION
IN AUSTENITIC STAINLESS STEELS USING ULTRASONIC SIGNALS
BY WAVELET ANALYSIS*

M. Khelil^{a,c}, J-H. Thomas^{a,b}, R. El Guerjouma^a, L. Simon^a et M. Boudraa^d
^aLAUM, CNRS, Université du Maine, Av. O. Messiaen, 72085 LE MANS, France
^bENSIM, Université du Maine, Rue Aristote, 72085 Le Mans, France
^cCSC, Centre de recherche scientifique et technique en Soudage et Contrôle, Route de dely
Ibrahim Bp64 Cheraga, Alger, Algérie
^dUSTHB, Faculté d'Electronique, Bp32 EL Alia, Bab Ezzouar, 16111, Alger, Algérie

Résumé

L'objectif de l'étude est de caractériser le bruit de structure et de détecter la présence d'éventuels défauts dans la structure auscultée. La caractérisation du bruit de structure se fait à partir de signaux Ascan. Ces signaux sont traités au moyen d'une analyse en ondelettes continues dont l'intérêt est d'offrir une représentation des signaux dans un plan temps - échelle. L'objectif ici est de savoir si chaque motif de la représentation est dû au bruit de structure ou à un défaut. La procédure mise en œuvre, repose sur une technique de détection basée sur un test d'hypothèse dans le plan temps - échelle. Des signaux typiques de bruit de structure sont alors décrits par un modèle autorégressif. L'approche est testée sur des signaux ultrasonores d'un acier inoxydable austénitique laminé puis d'une soudure dans cet acier et permet effectivement de séparer diverses composantes du signal.

Abstract

The aim of this study is to characterize the structural noise in order to better detect flaws in heterogeneous materials using ultrasonic waves. For this purpose, a continuous wavelet transform is applied to ultrasonic Ascan signals acquired using an ultrasonic Non Destructive Testing (NDT) device. The time-scale representation provided, which highlights the temporal evolution of the spectral content of the Ascan signals, is relevant but can lead to misinterpretation. The problem is to identify if each pattern from the wavelet representation is due to the structural noise or a flaw. To solve it, a detection technique based on statistical significance testing in the time-scale plane is used. Typical structural noise signals are then described using an autoregressive model. The approach is tested on experimental signals, obtained by ultrasonic NDT of austenitic stainless steel then of a welding in this steel and indeed enables to separate various components from the signal.

1. INTRODUCTION

Le travail rapporté dans cet article est consacré au contrôle non destructif CND par ultrasons des aciers inoxydables austénitiques en présence des défauts, de soudure et différents autres échos. Ce matériau est utilisé dans les pièces du circuit primaire des réacteurs nucléaires. Le contrôle de ces pièces doit donc détecter le moindre défaut nocif pour assurer le bon fonctionnement de ces installations. La génération des ondes ultrasonores en de tels matériaux provoque la propagation des ondes cohérentes mais également des ondes incohérentes connues sous le nom de bruit de structure. Ce bruit est engendré dans le signal ultrasonore par le phénomène de diffusion dans le matériau et peut ainsi masquer la présence d'un défaut. De nombreuses études s'intéressent au bruit de structure notamment pour la détection de défauts [1, 2], la caractérisation des signaux issus de ce type de matériau [3, 4] ou l'élimination du bruit lui-même [5, 6]. Le but de ce travail est de caractériser le bruit de structure, en utilisant la transformée en ondelettes continue et des tests d'hypothèses, afin de distinguer le bruit de structure, des autres échos dus aux défauts à partir d'une représentation temps-échelle ou temps-fréquence du signal. L'utilisation de tests d'hypothèse à partir d'une représentation temps-fréquence est rendue possible par une modélisation du bruit de structure. Notre étude s'inspire des travaux en géophysique [7, 8] qui montrent que l'approche est bien adaptée à la séparations des signatures dans le plan temps-fréquence. On propose une application de ce principe dans le domaine du CND par ultrasons. L'article est organisé comme suit. Dans la deuxième section on donne un bref rappel de la transformée en ondelettes continue, la troisième section est consacrée au matériau étudié, à savoir une présentation des données expérimentales obtenues par CND sur l'acier austénitique et la soudure. Dans la quatrième section, nous présentons l'outil d'analyse développé ainsi que le principe théorique et ses applications. La cinquième section sera consacrée aux résultats obtenus.

2. TRANSFORMEE EN ONDELETTES CONTINUE

La transformée en ondelettes continue d'un signal x est définie par [9] :

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

Elle permet de mesurer l'interaction du signal $x(t)$ avec un motif appelé ondelette analysante considérée à une certaine échelle a au voisinage d'un instant b . Cette ondelette analysante $\psi_{a,b}(t)$ telle que :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (2)$$

se déduit par dilatation ou compression avec le paramètre a et translation avec le paramètre b d'une ondelette mère $\psi(t)$. L'utilisation de plusieurs échelles au travers de la transformée en ondelettes permet d'obtenir une représentation dans un plan temps-échelle où le contenu du signal va être décomposé à différentes échelles au cours du temps. Il est à noter que les échelles sont inversement proportionnelles aux fréquences présentes dans le signal et il est donc aisé de passer d'un plan temps-échelle à un plan temps-fréquence.

Très souvent la représentation utilisée est celle du scalogramme défini comme le carré du module des coefficients d'ondelettes [10]: $|W_x(a,b)|^2$

3. MATERIAUX

L'approche est testée sur des signaux expérimentaux obtenus par échographie ultrasonore d'un matériau métallique (acier inoxydable austénitique laminé) puis d'une soudure dans cet acier. Ce matériau a été testé en onde transversale avec un angle d'orientation de 60°. Le transducteur utilisé pour ce contrôle a une fréquence centrale de 2 MHz avec une fréquence d'échantillonnage de 50 MHz. Pour cet essai, 643 Ascan ont été enregistrés [11]. La figure Fig.1 représente l'image Bscan obtenue pour ce matériau. Dans cette image, on distingue une zone d'échos de rebonds dus au support du transducteur, une zone de bruit de structure dans le métal de base, une zone de surintensité du bruit et des échos de défauts.

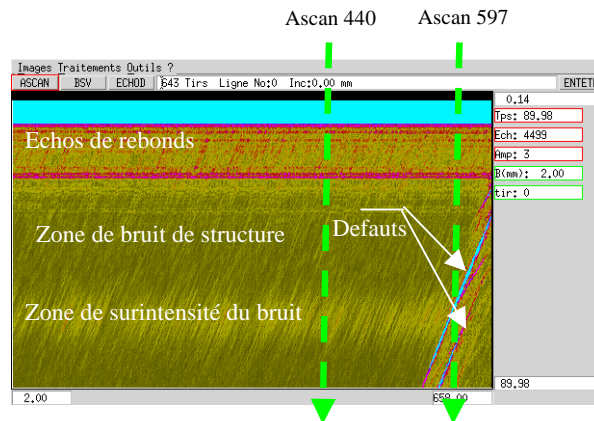


Fig.1 Image Bscan

Pour cet essai nous avons choisi de travailler sur deux signaux Ascan (Ascan N° 440 et Ascan N° 597) indiqués sur la figure Fig.1 et représentés sur les figures Fig.2 et Fig.3. Ces deux trajets sont intéressants car le premier passe par une zone de bruit de structure sans défaut et le second traverse des défauts.

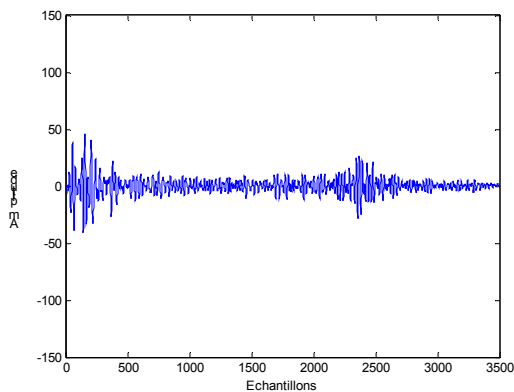


Fig.2 Ascan 440

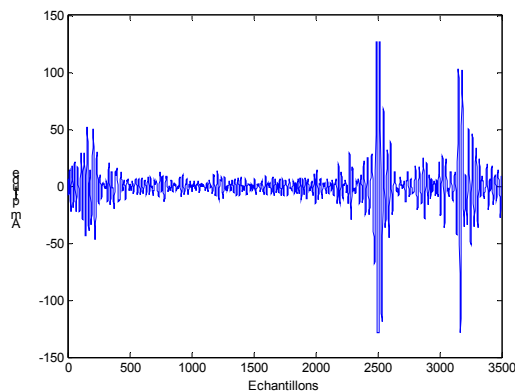


Fig.3 Ascan 597

4. METHODE

Le point de départ de l'étude est la représentation d'un signal Ascan dans un plan temps-échelle. Cette représentation est obtenue en opérant une transformée en ondelettes continues sur le signal de façon à présenter un scalogramme. Une telle représentation comme celle de la figure Fig.4 peut être difficile à interpréter. L'objectif de l'étude est de fournir une information quantitative dans l'interprétation de chaque motif de la représentation temps-échelle afin de savoir si ces motifs correspondent à du bruit de structure ou à des défauts. Pour ce faire un test d'hypothèse est réalisé : il s'agit de tester la formulation « le motif correspond à un bruit de structure » contre « le motif est révélateur d'autre chose comme par exemple la signature d'un défaut ». Ainsi le test d'hypothèse nécessite une caractérisation du bruit de structure. L'approche utilisée est basée sur l'étude de la densité spectrale de puissance (DSP) expérimentale d'un signal Ascan révélateur de la présence de bruit de structure, DSP qui peut être approchée à l'aide d'un modèle autorégressif.

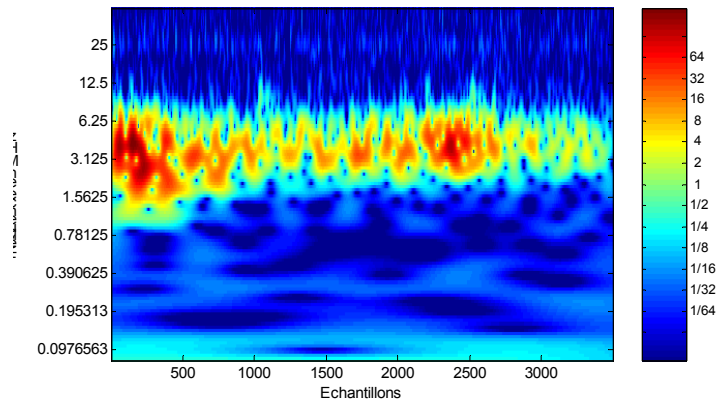


Fig.4 Scalogramme du signal Ascan 440

4.1 Modélisation du bruit de structure par modélisation autorégressive

Par une modélisation autorégressive, il est possible de synthétiser un signal dont les propriétés statistiques (en particulier la fonction d'autocorrélation) se rapprochent de celles d'un échantillon du bruit de structure. Cette modélisation consiste à filtrer un bruit blanc de variance σ^2 à l'aide d'un filtre à P coefficients a_i (avec $i=1, P$). Les coefficients du filtre ainsi que le bruit blanc d'entrée sont obtenus par la résolution du système d'équations de Yule-Walker [12]. Le signal synthétisé y_k s'écrit alors à l'instant k :

$$y_k = u_k - \sum_{i=1}^P a_i y_{k-i} \quad (3)$$

où u_k est un bruit blanc additif de variance σ^2 . Un des intérêts de cette modélisation est que la DSP du signal autorégressif (AR) s'écrit de manière analytique :

$$S(f) = \frac{\sigma^2}{\left| 1 + \sum_{i=1}^P a_i e^{-2j\pi f T_e} \right|^2} \quad (4)$$

Où T_e désigne la période d'échantillonnage des signaux. Cette DSP correspond ainsi à celle du bruit de structure modélisé.

La difficulté majeure de cette modélisation réside dans le choix de l'ordre P qui peut être fixé arbitrairement. Cependant, il existe des critères (le critère d'erreur de prédiction et le critère d'Akaike notamment) permettant de décider du nombre de paramètres P [12] :

$$\text{Erreur finale de pr\u00e9diction (Final Prediction Error)} : FPE(p) = \frac{N + p}{N - p} \hat{\sigma}_p^2 \quad (5)$$

$$\text{Crit\u00e8re d'Akaike (Akaike's Information Criterion)} : AIC(p) = 2p + N \log \hat{\sigma}_p^2 \quad (6)$$

Avec N le nombre d'\u00e9chantillons du signal, et $\hat{\sigma}_p^2$ la variance du bruit blanc \u00e0 l'entr\u00e9e d'un mod\u00e8le d'ordre p . L'ordre p du mod\u00e8le correspond g\u00e9n\u00e9ralement \u00e0 la valeur minimale des crit\u00e8res.

4.2 Test d'hypoth\u00e8se:

Le test d'hypoth\u00e8se est introduit pour d\u00e9terminer si un motif du plan temps-\u00e9chelle correspond \u00e0 du bruit de structure ou non. On peut montrer que lorsque les amplitudes du signal d'\u00e9tude sont distribu\u00e9es suivant une loi Gaussienne, alors le module au carr\u00e9 de son spectre suit une loi du chi2 \u00e0 deux degr\u00e9s de libert\u00e9 χ_2^2 . Le scalogramme du signal suit alors pour chaque \u00e9chelle une loi du chi 2 de telle sorte que [7,8] :

$$|W_x(a,b)|^2 \rightarrow \frac{1}{2} P_k \chi_2^2 \quad (7)$$

O\u00f9 P_k correspond au contenu fr\u00e9quentiel du signal pour la fr\u00e9quence $k f_e/N$, fr\u00e9quence associ\u00e9e \u00e0 une certaine \u00e9chelle a . f_e d\u00e9signe la fr\u00e9quence d'\u00e9chantillonnage. On a d'ailleurs (voir paragraphe 4.1) :

$$P_k = S(k f_e / N) = \frac{\sigma^2}{\left| 1 + \sum_{i=1}^p a_i e^{-2j\pi k / N} \right|^2} \quad (8)$$

Par rapport \u00e0 la loi pr\u00e9c\u00e9dente, il est alors possible de d\u00e9finir un intervalle de confiance (95% par exemple) pour lequel le scalogramme suit bien la loi du chi2 \u00e0 deux degr\u00e9s de libert\u00e9. Des valeurs du plan temps-\u00e9chelle sortant de l'intervalle indiquent alors la pr\u00e9sence de d\u00e9fauts.

5. EXPERIMENTATIONS ET RESULTATS

Dans cette \u00e9tude nous allons montrer des r\u00e9sultats relatifs au m\u00e9tal de base dans les aciers aust\u00e9nitiques inoxydables.

5.1. Mod\u00e9lisation autor\u00e9gressive du bruit de structure :

Le signal Ascan choisi pour la mod\u00e9lisation est issu de l'image Bscan (Fig.1), dans la zone du bruit de structure. Il est distribu\u00e9 normalement, ce qui est v\u00e9rifi\u00e9 par le test de Shapiro et Wilk [13]. Ce signal est mod\u00e9lis\u00e9 par un mod\u00e8le autor\u00e9gressif. Sa Densit\u00e9 Spectrale de Puissance est calcul\u00e9e directement \u00e0 partir des coefficients du mod\u00e8le AR eq (3). L'ordre du mod\u00e8le est calcul\u00e9 par les crit\u00e8res d'Akaike. Le minimum des deux fonctions FPE eq.(5) et AIC eq.(6) est obtenu pour un ordre $p=53$ (Fig.5).

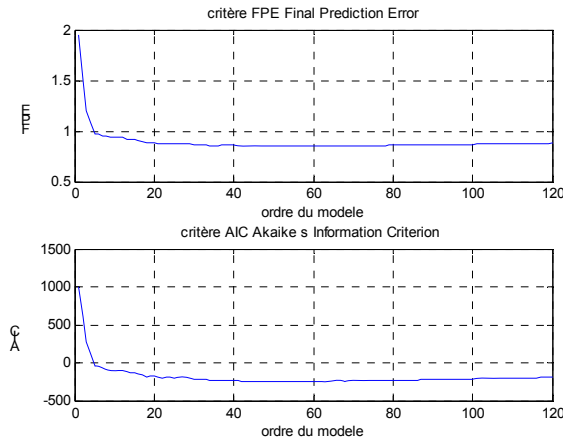


Fig.5 Critères d'Akaike

Nous illustrons dans la figure Fig.6, les fonctions d'autocorrélation du signal Ascan et du signal AR d'ordre 53. La figure Fig.7 illustre les densités spectrales de puissances (DSP) du signal Ascan (calculé par périodogramme de Welch), du signal AR d'ordre 53 et théoriques (eq.4).

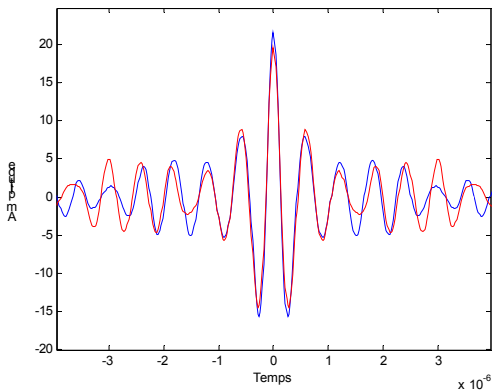


Fig.6 Autocorrélation du Ascan (bleu) et du signal AR d'ordre 53 (rouge)

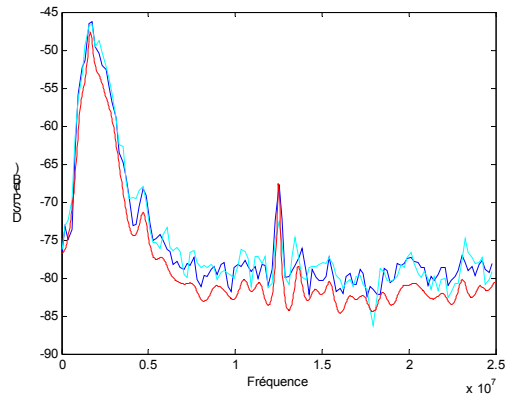


Fig.7 DSP (dB) du Ascan (bleu), du signal AR(cyan) et DSP théorique (rouge)

Les deux figures Fig.6 et Fig.7 illustrent bien une modélisation pertinente du bruit de structure à travers la comparaison des propriétés temporelles et fréquentielles du signal Ascan et du signal AR.

5.2. Etude dans le plans temps –échelle

Dans cette étude nous avons utilisé l'ondelette de Morlet [9]. Le scalogramme du signal Ascan 440 (Fig.8), extrait de l'image Bscan (Fig.1), est présenté à la figure Fig.9.

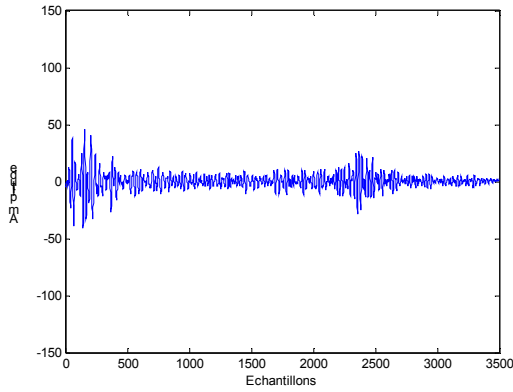


Fig. 8 Ascan 440

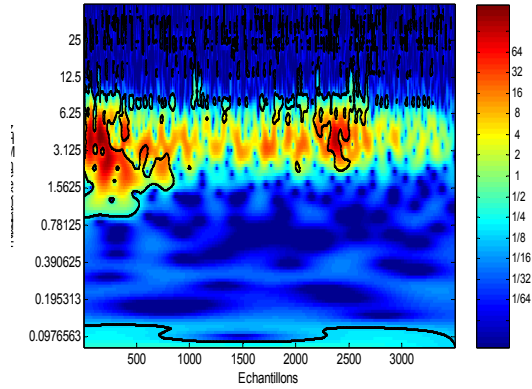


Fig. 9 Scalogramme du Ascan 440

Le résultat relatif au signal Ascan 597 (Fig.10), est donné par la figure (Fig.11) qui représente le scalogramme de ce signal.

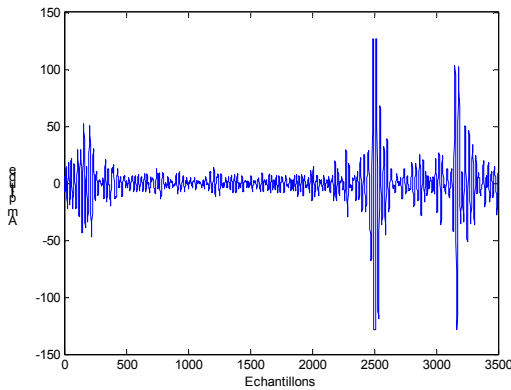


Fig 10 Ascan 597

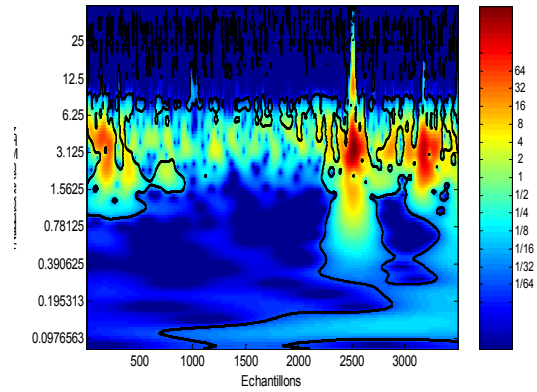


Fig 11. Scalogramme du Ascan 597

A partir de la DSP théorique (eq.4) calculée à partir des coefficients du modèle autorégressif d'ordre 53 des signaux de bruit de structure et du test d'hypothèse (eq.7), nous pouvons tracer les contours sur les scalogrammes. Ces contours sur les figures Fig.9 et Fig.11 montrent les zones qui ne sont pas du bruit de structure. En effet dans la représentation Fig.9 on retrouve bien les échos de la surintensité du bruit et les échos de rebond. Dans la seconde représentation Fig.11 on retrouve en plus de l'écho de rebond, les deux échos de défaut. Les contours sont donnés pour un niveau de confiance de 95%.

6. CONCLUSION

A travers les résultats obtenus et l'analyse des scalogrammes, l'approche mise en œuvre basée sur une modélisation du bruit de structure et un test d'hypothèse dans le plan temps-échelle (ou temps-fréquence) s'avère particulièrement intéressante dans la mesure où elle permet de différencier, les différents échos du bruit de structure dans un signal ultrasonore Ascan. Nous avons également montré comment le bruit de structure pouvait être modélisé à l'aide d'un modèle autorégressif. La même démarche pourrait être appliquée à d'autres matériaux à fort bruit de structure tels que les aciers moulés centrifugés et les bétons. Cette approche pourrait par ailleurs permettre des avancées significatives concernant l'estimation de la hauteur des défauts plans débouchant qui est basée sur la différence de temps de vol entre les échos de diffraction et les échos de coin, les échos de diffraction étant souvent noyés dans le bruit de structure notamment pour les aciers moulés centrifugés.

REMERCIEMENTS :

Les auteurs remercient les collègues d'EDF centre R&D des Renardières pour leur collaboration, notamment pour l'obtention des signaux ultrasonores

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. Saniie, et al, Quantitative grain size evaluation using ultrasonic backscattered echoes, JASA m.80 (6), December 1986
- [2] K. Kaya, et al, Flaw Detection in Stainless Steel Samples Using Wavelet Decomposition, 1994 ultrasonic symposium
- [3] S. Hirsekorn, Directional dependence of ultrasonic propagation in textured polycrystals, JASA 79, 1986, pp. 1269-1279.
- [4] Chassignole et al, ultrasonic propagation in austenitic stainless steel welds - approximate model and numerical methods results and comparison with experiments, CP509, Review of Progress in quantitative NDE, American Institute of physics 2000.
- [5] A. Abbate et al, Signal Detection and Noise Suppression Using a Wavelet Transform Signal Processor: Application to Ultrasonic Flaw Detection, IEEE UFFC, Vol. 44, Jan 1997.
- [6] M.A.G. Izquierdo et al, Time-varying prediction filter for structural noise reduction in ultrasonic NDE, Ultrasonics 44 (2006) pp. 1001–1005
- [7] T. Christopher, P.C. Gilbert, A practical guide to Wavelet analysis, Bulletin of the American Meteorological Society 79, 61-78.
- [8] S. Jevrejeva, et al, Influence of the Arctic Oscillation and El Nino-Southern Oscillation (ENSO) on ice in the Baltic Sea: the wavelet approach, J. Geophys, Res, 108 (D21), 2003.
- [9] S. Mallat, A Wavelet Tour of Signal Processing, 2nd edition, New York Academic, 99.
- [10] G. Kaiser, A Friendly Guide to Wavelets, Birkhäuser, 1994
- [11] H. Dhifaoui, et al, Time-frequency and time-scale representations for the ultrasonic Non Destructive Testing and Evaluation of materials with high structural noise, International Congress on Ultrasonics, Vienna, April 9-13, 2007
- [12] S.M. Kay, Modern Spectral Estimation: Theory and Application, Prentice Hall 1988.
- [13] S. S. Shapiro et al, A Comparative Study of Various Tests for Normality, Journal of the American Statistical Association, Vol. 63, N. 324, (Dec 1968), pp. 1343-1372.