CARACTERISATION DE SIGNAUX DE CONTROLE NON DESTRUCTIF PAR L'ANALYSE MULTI-ECHELLES

P.SIMARD - N.COLIN - M.BULO

Université de Technologie de Compiègne - UA CNRS Heudiasyc
BP 649 - 60206 Compiègne cedex

RÉSUME

Dans cet article, nous présentons des résultats obtenus par une analyse en ondelettes de signaux de contrôle non destructif de matériaux. Après avoir rappelé les fondements de cette méthode, nous essayons, à travers trois exemples très différents,de cerner les limites éventuelles, et de montrer l'intérêt de cet outil de traitement du signal.
Ce travail fut en partie réalisé grâce au greco cnrs TDSI.

SUMMARY

In this article, we present results obtained by the application of a wavelet transform on Non Destructive Testing signals. First of all, we will present the method, and then, three differents examples will help us to show the limits, but also the interest of this new tool for Signal Processing.

Principe et intérêt d'une représentation temps-fréquence

Dans l'analyse de Fourier, les fonctions élémentaires sur lesquelles on décompose le signal ne dépendent que d'un paramètre : la fréquence. On sait que l'inconvénient de ces fonctions est d'être totalement délocalisées sur le plan temporel, et par suite, cette représentation ne permet pas facilement de savoir à quel instant apparaissent les fréquences que l'on retrouve sur le spectre.
En représentation temps-fréquence, on utilise des fonctions élémentaires notée Ψ^a_b dépendant de 2 paramètres, a est lié à la fréquence et b au temps .On associe à chaque fonction élémentaire un coefficient

$$C_{a,b} = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)\, \Psi^b_a(t)\, dt \;;\quad s(t) \text{ est le signal étudié.}$$

La transformée de Fourier à fenêtre glissante

Cette méthode classique mise au point par Gabor consiste à découper arbitrairement le signal en des plages de longueurs limitées. Chaque plage est étudiée séparément l'une de l'autre par Transformée de Fourier. En fait, on décompose le signal sur un ensemble de fonctions élémentaires $\Psi^a_b(t)$ qui dérivent d'une même fonction fenêtre $\Psi(t)$ par translation dans le temps et modulation en temps, soit :

$$\Psi^a_b(t) = \cos(2\pi a t).\Psi(t-b).$$

L'inconvénient souvent cité [1] est que la longueur de la plage est fixée une fois pour toute, et que l'on ne peut guère espérer dans ces conditions une analyse identiquement fine de phénomènes dont les échelles en temps sont très différentes.

Analyse par Ondelettes :

Une alternative à priori intéressante pour régler ce problème consiste à utiliser des fonctions $\Psi^a_b(t)$ très particulières : les Ondelettes, que l'on définit comme les vibrations les plus courtes envisageables dans une plage donnée de fréquences. L'idée est d'obtenir des fonctions très concentrées à la fois en temps et en fréquence. La première ondelette proposée par Morlet pour des problèmes de géophysique est la suivante :

$$\Psi^a_b(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\cos\left(\frac{5.(t-b)}{a}\right).e^{-\frac{1}{2}.\left(\frac{(t-b)}{a}\right)}$$

On a ici un ensemble de fonctions élémentaires dérivant les unes des autres par une translation en temps définie par le

paramètre b et/ou une contraction (dilatation) en temps définie par le paramètre a.
On doit alors en principe disposer d'un outil efficace pour analyser des phénomènes à toutes les échelles.

L'Analyse Multi-Echelles [2] [3] [4]

Les structures qu'il peut être important de caractériser, que ce soit dans un signal monovariable ou dans une image, sont souvent à des échelles différentes. A priori, on ne sait pas à quel niveau de résolution se trouve l'information que l'on cherche.
De nombreuses recherches ont permis de définir le principe de la transformation Echelle. Cette transformation associe à un signal donné une approximation de celui-ci à une echelle s. Récemment un lien fut établi entre cette transformation et la théorie des ondelettes.
Une transformation échelle permettant de passer un signal de l'échelle s_0 à l'échelle s_1 ($s_1 > s_0$) ne doit calculer que l'information supplémentaire, et non pas recalculer l'information redondante.
On montre que cette information supplémentaire est directement liée à la transformation en ondelettes, et peut être calculée par une transformation pyramidale, qui a la bonne idée d'être réversible.

D'un point de vue mathématique, une transformation échelle à un niveau de résolution 2^j est une projection orthogonale sur un espace V_j d'une séquence d'espaces vectoriels multi-échelles $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$. Il faut donc, pour calculer cette projection pour tout signal s(t), trouver une base orthogonale de V_j.

Différentes solutions permettent de résoudre ce problème ; Il nous a semblé intéressant de retenir le résultat de S.Mallat qui montre que l'on peut calculer une base orthonormale à partir d'une fonction unique $\Phi(t)$ appelée fonction échelle:

$\forall \; j \in \mathbb{Z} \qquad \{\sqrt{2^j}.\Phi(2^j t-n)\}_{n \in \mathbb{Z}}$ est une base orthonormale de V_j
On construit ainsi une base orthonormale de l'espace V_j en changeant l'échelle des $\Phi(t)$ par un coefficient 2^j, puis en translatant la fonction obtenue sur une grille dont les intervalles sont proportionnels à 2^j.

Application :

Il faut noter qu'en traitement numérique des signaux, l'échelle du signal d'entrée est déjà limitée par la fréquence d'échantillonnage. Toutefois, on montre que la transformation préserve l'information.

Conclusion :

On a donc ici un outil nouveau pour le traitement du signal, parfaitement rigoureux sur le plan théorique, susceptible de fournir des informations de type temps-fréquence.
De ce point de vue, on peut se demander si cette transformée ne serait pas à même d'isoler les phénomènes qui composent un signal en trouvant, par exemple, le meilleur espace de projection où apparaitraient les détails qui caractérisent un signal. Ceci ouvrirait alors des perspectives nouvelles pour la recherche de paramètres destinés à permettre la classification de signaux. Les exemples d'applications qui suivent ont été obtenus sur des signaux de Contrôles Non Destructifs, par Ultrasons, Courants de Foucault et Vibrations.

L'algorithme implémenté est basé sur les travaux de S.Mallat, et décortique le signal à l'aide de Filtres Miroirs Quadratiques. On obtient en sortie d'une séquence de filtres, deux signaux: Une approximation du signal d'entrée à l'échelle inférieure, et un signal de détails, tels que la somme des deux contienne la même information que le signal à l'échelle supérieure. Les figures représentent les signaux de détails à différents niveaux d'analyse.

Applications à l'analyse de signaux de Contrôles Non Destructifs

1. Surveillance vibratoire de réducteur à engrenages: détection de l'écaillage de dentures

Il s'agit d'un contrôle de vibrations réalisé durant le fonctionnement normal de réducteurs à engrenages. On souhaite détecter de façon précoce l'apparition d'un défaut localisé sur une (ou plusieurs) dents. Ce défaut, l'écaillage, est susceptible d'évoluer très rapidement vers la rupture de la dent.
On dispose d'enregistrements effectués sur banc d'essais à raison d'un enregistrement par jour suivi d'un examen de l'état des dentures.
La figure [1] montre les résultats obtenus pour trois analyses correspondant aux 6ème, 8ème, et 10ème jour.
L'examen visuel a révélé les défauts suivants :
6ème jour : début d'écaillage des dents 5 et 6
8ème jour : légère évolution de cet écaillage
début d'écaillage de la dent n°14
10ème jour: évolution de l'écaillage sur les dents 5 et 6
écaillage sur toute la largeur de la dent 14
Les créneaux qui figurent au dessus des signaux bruts indiquent le passage de la dent n°1. La portion de signal comprise entre deux créneaux contient donc l'information de toute la roue, qui compte 20 dents.
On pouvait dans ce cas espérer que l'analyse en ondelettes permettrait de résoudre ce problème. En effet, il est possible que la modification physique d'une dent entraine des modifications de certaines composantes fréquentielles, et donc un signal plus complexe, que l'analyse multi-échelles pourrait décortiquer. De plus, il est intéressant de savoir quelle est la dent concernée afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec ceux fournis par l'inspection.
Dans ce but, nous avons appliqué l'algorithme à ces données et descendu le signal de 5 niveaux en échelle. La figure [1] ne montre que les trois premiers. Les zones concernant les dents 5 et 14 sont indiquées par des flèches.
Le résultat n'est pas satisfaisant. On constate toutefois une augmentation générale des amplitudes du signal de détails au premier niveau. Il semble bien qu'un pic apparait au niveau de la dent n°14 au 10ème jour. Par contre, les niveaux suivants ne fournissent plus d'indications.

2 - Contrôle par courants de Foucault de tubes métalliques.

Le problème consiste à détecter un défaut (ex: inclusions, fissures) au moyen du signal délivré par une sonde qui engendre des courants de Foucault dans la pièce à contrôler.

Le signal est fortement bruité, le bruit est coloré, et les dsp du signal et du bruit se recouvrent largement.

Sur l'exemple de la figure [2], on peut distinguer dans le dernier quart du signal un pic de grande taille partiellement noyé dans du bruit. L'analyse en ondelettes peut-elle dégager ce signal qui nous intéresse, ou tout au moins le caractériser? La réponse est négative. Les cinq signaux de détails présentés ne permettent plus de retrouver ce pic. En tout cas, la recherche du phénomène apparait plus compliquée que sur le signal brut. Il nous semble que cet exemple est caractéristique d'un cas où l'analyse en ondelettes ne donnera pas de résultat.

En effet, ainsi que nous l'avons indiqué, l'analyse se ramène à un filtrage. Par conséquent, dans un cas où signal et bruit appartiennent à la même bande étroite fréquentielle, cette analyse ne donnera pas de résultat.

3 - Contrôle par Ultrasons d'une plaque composite verre - époxy

Le dernier exemple proposé ici concerne le contrôle par échographie ultrasonore de plaques composites en Verre - Epoxy. Les plaques composites présentent classiquement trois types de défauts : Des délaminages, qui sont des décollements entre les différentes couches qui composent le matériau, des porosités, qui sont des zones qui manquent de fibres, et enfin des zones à trop forte proportion de verre.

L'échographie fournit facilement des indications pour discerner les deux premiers types de défauts. Les délaminages se caractérisent d'un point de vue physique par une importante rupture d'impédance, ce qui se traduit par un écho supplémentaire bien net entre l'écho d'interface, et l'écho de fond. Les porosités entrainent une diffusion du signal telle que l'énergie est dissipée avant que l'écho de fond n'ait pu être détecté, et c'est son absence qui permet la classification.

Par contre, il est très difficile de distinguer un signal enregistré dans une région saine du matériau d'un signal enregistré dans une zone à taux de verre élevé.

Les signaux de la figure [3] sont typiques. A part une zone centrale plus plate dans le cas "verre" que dans le cas "sain", rien ou presque ne distinguent ces signaux. Nous avons montré comment on pouvait aborder avec succès ce problème à l'aide de traitement d'image **[5]**. Toutefois, pour des raisons de temps de contrôle, il serait intéressant de pouvoir prendre une décision sur un seul signal, quitte à faire une analyse statistique des résultats obtenus pour un contrôle complet de la plaque, qui correspond à un balayage régulier de sa surface.

Or il se trouve que l'analyse en ondelette permet de faire apparaitre un comportement d'échelle différent sur les niveaux 1 et 2, et ce pour une majorité de signaux. Ce résultat semble intéressant et demanderait à être confirmé sur d'autres signaux provenant de contrôles similaires.

Conclusions :

L'analyse en ondelette est, de l'avis même de ses créateurs, un outil mathématique s'ajoutant aux méthodes dites classiques d'analyse du signal.

La littérature est désormais assez bien fournie en matière d'algorithme (signalons l'existence d'une transformée rapide **[6]**). Toutefois, il reste à notre avis à en délimiter l'usage.

Pour l'analyse de signaux, tels que nous venons d'en présenter, l'intérêt est finalement limité, et les outils modernes de traitement du signal nous semblent bien plus puissants, en particulier ceux qui font appel à la modélisation et mettent l'accent sur les propriétés et les relations statistiques des signaux. **[7]**

Par contre, il est clair que cet outil est adapté aux problèmes de compression, en particulier d'image, de codage et de transmission, car le filtrage réalisé conserve la totalité de l'information et possède de bonnes propriétés de phase, et en particulier devrait trouver des applications en robotique.

Toutefois, nous avons présenté ici des résultats obtenus avec une ondelette particulière, connue sous le nom de chapeau mexicain, et avec un algorithme particulier, celui de S.Mallat. D'autres résultats non présentés ici furent obtenus avec l'ondelette de Morlet et son algorithme qui fournit une analyse en module et phase en calculant les coefficients d'ondelettes. Mais ceux-ci furent difficilement interprétables, probablement à cause du niveau de bruit. A priori, n'importe quelle fonction de moyenne nulle est susceptible de fournir une ondelette analysante : Les conditions d'admissibilités sont connues et imposent pour l'essentiel que la fonction choisie ne comporte pas de très basses fréquences (fréquence zéro et voisinage de zéro au sens mathématique). Il reste à faire une étude comparative de toutes ces méthodes avant de juger de leur intérêt.

Bibliographie

[1] Yves Meyer, Stéphane Jaffard et Olivier Rioul
"L'analyse en Ondelettes"
Pour la Science - septembre 1987

[2] S.G. Mallat
"A Theory for Multiresolution Signal Decomposition : The WaveletRepresentation"
GRASP Lab Dept of Computer and Inf.Science - University of Pensylvania, Philadelphia, P.A. 19104.6389;May 1987

[3] S.G.Mallat
"Scale Change versus Scale Space Representation"
idem

[4] S.G. Mallat
" Multiresolution Approximation and Wavelets"
idem

[5] N.Colin, P.Simard, and al.
"Contribution à l'Automatisation du Contrôle Non Destructif par Ultrasons de plaques en Fibres de Verre"
Proceeding of the 4th European Conference On Non Destructive Testing, vol 3, p1715-1728, sept.1987

[6] Olivier Rioul
"Un algorithme rapide de décomposition discrète de signaux échantillonnés en ondelettes orthogonales"
IGE. Ecole Nationale Supérieure des Telécommunications.

[7] Fatos Qendro, B.Benoist and al.
"Interpolation de Signaux. Application a l'Estimation de Signaux Impulsionnels Noyés dans un bruit additif stationnaire à bande étroite" à paraître GRETSI 89,

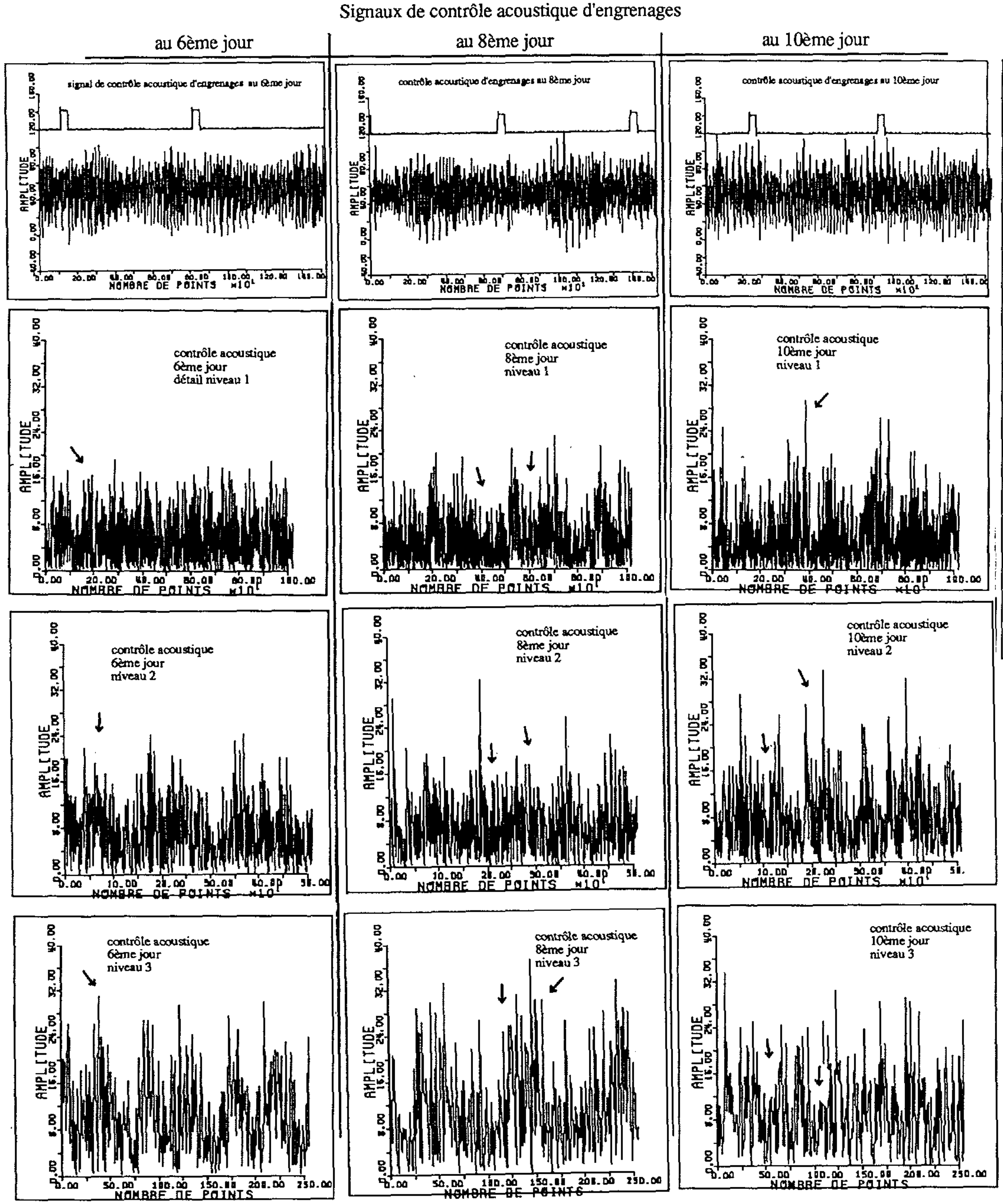

Figure 1 : Surveillance vibratoire de réducteur à engrenages

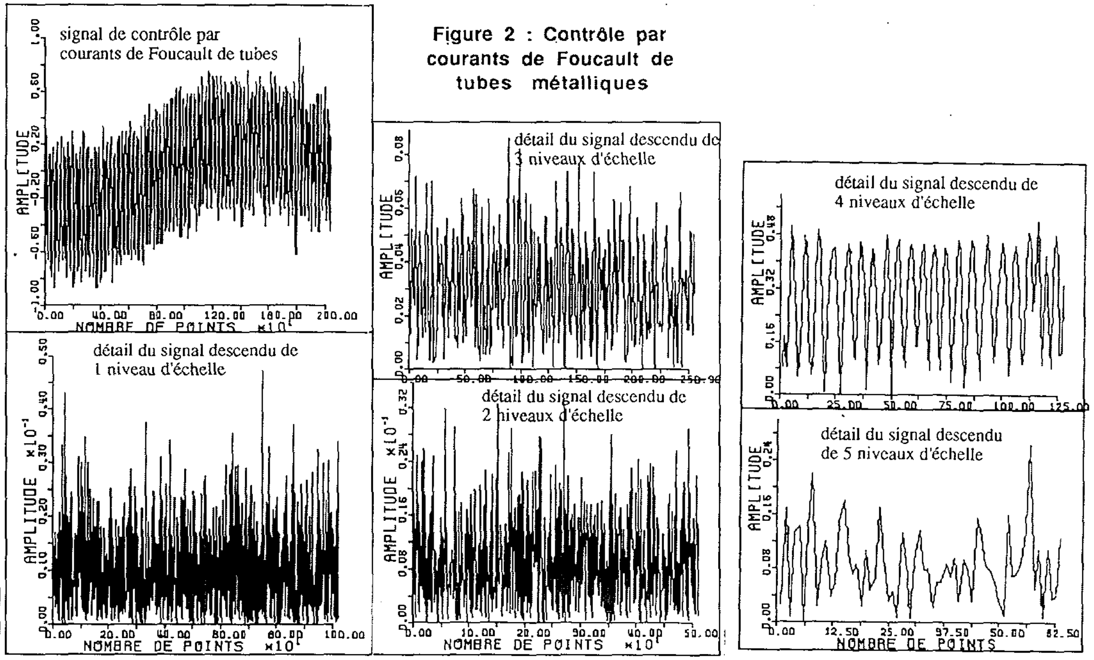

Figure 2 : Contrôle par courants de Foucault de tubes métalliques

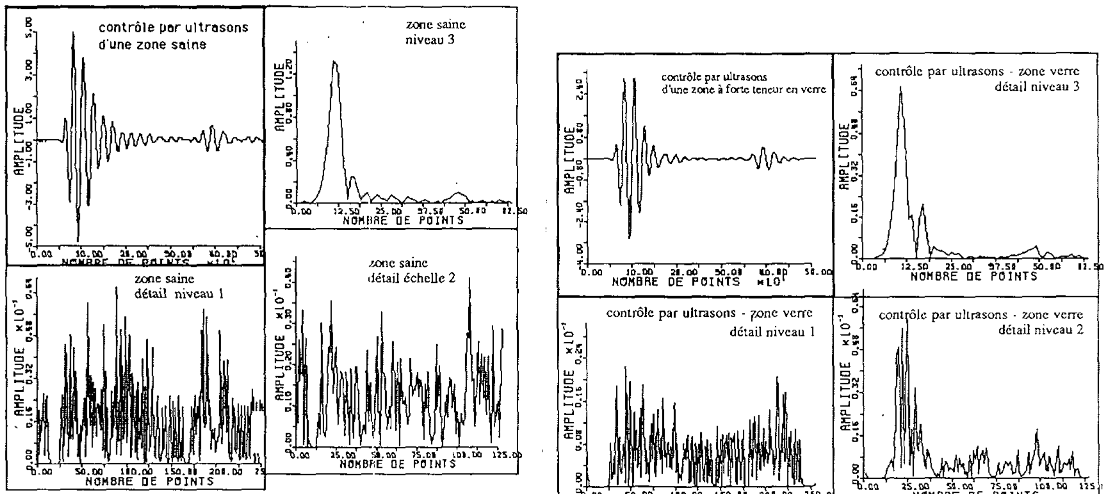

Figure 3 : Contrôle par ultrasons d'une plaque composite verre-epoxy