

EVALUATION DE METHODES DE RESTAURATION DE
SIGNALS (COURANT DE FOUCAULT)
- COMBINAISON DE FREQUENCES
- CORRELO-FILTRE

Y. POUPEAU
F. LEFEVRE

EDF/DER/EP/SDM
6, quai Watier F78400 CHATOU

On se propose d'étudier et de comparer deux méthodes permettant la restauration des signaux de contrôle des tubes de générateur de vapeur des centrales nucléaires (REP 900 et 1300 MW) par Courants de Foucault bruités par un signal pseudo-périodique. Ce type de contrôle (multi-fréquence) ainsi que l'origine du bruit permet l'utilisation de filtre à référence de bruit.

Une méthode numérique : la combinaison de fréquences, issue directement des techniques analogiques utilisées par les contrôleurs, est comparée à une version modifiée du corrélo-filtre [1].

1. INTRODUCTION

L'intégrité des tubes de générateur de vapeur des centrales nucléaires (REP 900 et 1300 MW) est assurée par un contrôle périodique non destructif par Courant de Foucault.

Les Courants de Foucault (C.d.F.) sont des courants induits dans un matériau conducteur lorsque celui-ci est "baigné" dans un champ magnétique variable. Quand ce matériau présente une hétérogénéité dimensionnelle, structurelle ou une modification de ses propriétés intrinsèques (μ, ρ), le trajet des Courants de Foucault est perturbé (Loi de Lentz). Lorsque l'inducteur du champ magnétique est un bobinage, son impédance varie en fonction de la répartition des Courants de Foucault. Le contrôle consiste alors à analyser les variations résistives (voie x du signal) et inductives (voie y du bobinage) lors de son déplacement dans le tube inspecté.

Une analyse visuelle des signaux complexes (voies x et y) relatifs aux trois fréquences de contrôle des tubes (la pénétration des C.d.F. est inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence d'excitation de la sonde) permet de les examiner sur toute leur épaisseur.

La détection d'éventuels défauts au sein du tube (pique, corrosion, ...) est perturbée par un bruit dû à l'état de surface des tubes. Ce "bruit de structure" engendré par les variations d'entrefer tube-sonde apparaît sur les voies (x et y) des deux fréquences de contrôle les plus élevées. L'hypothèse d'additivité entre les signaux de défauts et ce bruit autorise l'utilisation de méthodes de filtrage à référence de bruit.

Deux algorithmes permettant l'élimination du bruit sont évalués :

We propose to study and compare two methods of Eddy-current signals' restoration typically used in non destructive testing of steam generator's tubes of nuclear power plant (900 and 1300 MW). These inspections (many frequencies) and the noise origin permit the use of noise reference filters.

The first numeric method : called "mixed frequencies", which comes from analogic inspection's methods is compared to a new recursive corrélo-filtre" algorithm [1].

- Les "combinaisons de fréquences", extension numérique d'une méthode largement utilisée dans les chaînes analogiques de contrôle multifréquence, éliminent le bruit de structure par combinaison du signal à interpréter et du signal de référence-bruit (fréquence de contrôle la plus élevée). L'originalité de la méthode réside en l'estimation des coefficients de la matrice de combinaison.

- Le corrélo-filtre, modification de la méthode développée par D. BAUDOIS et A. SILVENT [1], permet d'estimer en fonction d'une référence de bruit (fréquence de contrôle la plus élevée), le bruit perturbateur de façon itérative.

2. PRESENTATION DU PROBLEME

Les contrôles des tubes sont effectués à trois fréquences d'excitation de sonde différentes permettant ainsi d'en explorer toute l'épaisseur :

- la fréquence $F_1 = 600$ KHZ permet de voir l'intérieur du tube
- la fréquence $F_2 = 280$ KHZ permet de voir l'intérieur et l'extérieur du tube
- la fréquence $F_3 = 120$ KHZ permet de voir l'extérieur du tube.

L'interprétation du signal de fréquence de contrôle F_2 est parfois rendue difficile par la présence d'un bruit reflétant l'état de surface du tube (Figure 1).

Ce bruit stationnaire pseudo-périodique peut être considéré comme additif aux signaux de défauts recherchés (transitoires d'amplitude équivalente à celle du bruit).



Dans ce cas le contrôleur détecte et caractérise les défauts en élaborant un signal, combinaison des fréquences F_2 et F_1 (référence de bruit). Cette caractérisation s'effectue en calculant l'amplitude et la phase des signaux représentés en Lissajous (voie x fonction voie y).

3. DESCRIPTION

Nous commençons par la présentation de la méthode dérivée des contrôles "les combinaisons de fréquences" qui ne s'appliquent qu'à des signaux complexes échantillonnés en phase.

3.1. Les combinaisons de fréquences

Nous noterons $x_1(k)$ et $y_1(k)$ les échantillons respectifs des voies réelles et imaginaires du signal de fréquence de contrôle F_1 à l'instant k.

L'opération de combinaison de fréquences se traduit alors par l'expression :

$$(1) \begin{bmatrix} x_c(k) \\ y_c(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} + [M] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ y_1(k) \end{bmatrix}$$

(x_c, y_c) signal de combinaison

$[M]$ matrice de combinaison.

Aucune contrainte n'est imposée dans le calcul des coefficients de la matrice $M = \{a_{ij}\}$. Les a_{ij} sont en effet déterminés par le type de combinaison voulue (élimination du bruit de structure). C'est pourquoi l'estimation de M se fait sur des signaux de référence par l'obtention d'un résidu de combinaison (x_c, y_c) aussi faible que possible.

Soit le critère quadratique à minimiser :

$$E_t = \sum_{k=1}^N (x_c^2(k) + y_c^2(k))$$

N longueur du signal de référence

$$(2) E_t = \sum_{k=1}^N \{ [(x_2(k) + a_{11} x_1(k) + a_{12} y_1(k))^2 + [y_2(k) + a_{21} x_1(k) + a_{22} y_1(k)]^2 \}$$

Par résolution du système d'équations :

$$\frac{\partial E_t}{\partial a_{ij}} = 0$$

Nous obtenons la formulation suivante :

$$a_{11} = - \frac{\sum_{k=1}^N x_1(k) x_2(k)}{\sum_{k=1}^N x_1^2(k)} + \frac{\sum_{k=1}^N y_1(k) x_2(k)}{\sum_{k=1}^N x_1(k) y_1(k)}$$

$$a_{12} = - \frac{\sum_{k=1}^N x_1^2(k) \sum_{k=1}^N y_1(k) x_2(k)}{D} + \frac{\sum_{k=1}^N x_1(k) y_1(k) \sum_{k=1}^N x_1(k) x_2(k)}{D}$$

$$a_{21} = - \frac{\sum_{k=1}^N x_1(k) y_2(k) \sum_{k=1}^N y_1^2(k)}{D} + \frac{\sum_{k=1}^N x_1(k) y_1(k) \sum_{k=1}^N y_1(k) y_2(k)}{D}$$

$$a_{22} = - \frac{\sum_{k=1}^N x_1^2(k) \sum_{k=1}^N y_1(k) y_2(k)}{D} + \frac{\sum_{k=1}^N x_1(k) y_1(k) \sum_{k=1}^N x_1(k) y_2(k)}{D}$$

$$D = \sum_{k=1}^N x_1^2(k) \sum_{k=1}^N y_1^2(k) - (\sum_{k=1}^N x_1(k) y_1(k))^2$$

$$D = \sum_{k=1}^N x_1^2(k) \sum_{k=1}^N y_1^2(k) - (\sum_{k=1}^N x_1(k) y_1(k))^2$$

$$D = \sum_{k=1}^N x_1^2(k) \sum_{k=1}^N y_1^2(k) - (\sum_{k=1}^N x_1(k) y_1(k))^2$$

$$D = \sum_{k=1}^N x_1^2(k) \sum_{k=1}^N y_1^2(k) - (\sum_{k=1}^N x_1(k) y_1(k))^2$$

L'élimination du bruit des signaux de fréquence de contrôle F_2 est obtenue en appliquant la formule (1) à chaque point du signal.

La minimisation du critère (2) E_t nécessite un filtrage passe-bande préalable des signaux de référence. Cette opération peut être évitée en écrivant le critère sous sa forme fréquentielle :

$$(3) E_f = \sum_{k=f_{min}}^{f_{max}} \{ |\hat{x}_c(k)|^2 + |\hat{y}_c(k)|^2 \}$$

Avec :

$[f_{min}, f_{max}]$: spectre utile des signaux

$\hat{x}_c(k)$ et $\hat{y}_c(k)$: échantillons des T.F.D. de $x_c(t)$ et $y_c(t)$

L'estimation des $\{a_{ij}\}$ s'obtient alors de la même façon que précédemment.

3.2. Méthode dérivée du corrélo-filtre [1]

3.2.1. Algorithme

Soit un signal $x(t)$ composé d'un signal $s(t)$ perturbé par un bruit $b(t)$ ($s(t)$ et $b(t)$ non corrélés).

$$x(t) = s(t) + b(t)$$

Avec :

$$b(t) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i t + \phi_i) \quad N \text{ fini}$$

b(t) est un bruit composé d'un nombre limité de raies

et soit b₁(t) référence de bruit s'écrivant :

$$b_1(t) = \sum_{i=1}^N B_i \sin(\omega_i t + \mu_i)$$

(même contenu fréquentiel que b(t))

En calculant l'inter-corrélation entre x(t) et b₁(t) on obtient :

$$C_{xb_1}(t) = \sum_{i=1}^N \frac{A_i B_i}{2} \cos(\omega_i t + \phi_i - \mu_i)$$

En se fixant une durée T₁ finie d'intégration, calculons la fonction F(τ) suivante :

$$F(\tau) = \frac{1}{T_1} \int_{\tau}^{\tau+T_1} b_1(t) \times C_{xb_1}(t-\tau) dt$$

(opération de filtrage adapté de longueur T₁)

ce qui donne :

$$F(t) = \sum_{i=1}^N \frac{A_i B_i^2}{4} \sin(\omega_i t + \phi_i) + \sum_{i=1}^N f_i(t)$$

avec :

$$f_i(t) = \frac{A_i B_i}{4 T_1} \left[\sum_{j=1}^N \frac{2}{\omega_i + \omega_j} (\sin(\omega_i t + \frac{(\omega_i + \omega_j)}{2} T_1 + \phi_i - \mu_i + \phi_j - \mu_j) \cdot \sin(\frac{(\omega_i + \omega_j)}{2} T_1) + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^N \frac{2}{\omega_i - \omega_l} \right. \\ \left. \cdot (\sin(\omega_i t + \frac{(\omega_i - \omega_l)}{2} T_1 + \phi_i - \mu_i + \phi_l - \mu_l) \cdot \sin(\frac{(\omega_i - \omega_l)}{2} T_1)) \right]$$

A ce stade du calcul, afin d'estimer facilement le bruit perturbateur, il est nécessaire de prendre en considération l'aspect physique des signaux à analyser.

Dans un signal composé de plusieurs raies, il est fréquent que certaines raies soient beaucoup plus énergétiques que d'autres. C'est notamment le cas pour les "Courants de Foucault". De plus, les signaux de défauts étant de courte durée (transitoire), l'énergie de x(t) est pratiquement égale à l'énergie de b(t).

En tenant compte de la remarque ci-dessus et en supposant que la fréquence ω_k soit la plus énergétique parmi les N composants le bruit on peut écrire que :

$$2 \cdot \sigma_x^2 \approx 2 \cdot \sigma_b^2 \approx \sum_{i=1}^N A_i^2 \approx A_k^2 (1 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N \alpha_i)$$

$$\text{avec : } \sum_{\substack{i=1 \\ i=k}}^N \alpha_i \ll 1$$

Si la référence de bruit est issue du même phénomène physique on peut écrire :

$$2 \cdot \sigma_{b_1}^2 \approx B_k^2 (1 + \sum_{\substack{i=1 \\ i=k}}^N \alpha_i)$$

Dans de telles conditions, en prenant T₁ égal à nπ/ω_k, on peut dire que :

$$\sum_{i=1}^N f_i(t) \approx 0$$

$$\text{En calculant : } x(t) - F(t)/G \text{ avec } G = \sqrt{\frac{\sigma_F^2}{\sigma_x^2}} = \frac{B_k^2}{4}$$

on obtient x₁(t) = s(t) + b'(t)

avec b'(t) nouveau bruit perturbateur ne contenant plus la fréquence dominante ω_k.

En recommençant N fois l'opération en prenant à chaque fois x₁(t) comme nouveau signal bruité, les fréquences dominantes du signal sont atténuées de façon itérative. Le lecteur trouvera Figure 4 le synoptique du corrélo-filtre.

3.2.2. Simulation numérique

Soit un signal de plaque (Courants de Foucault) Figure 5 auquel on ajoute du bruit b(t) composé de trois sinus d'amplitudes, phases et fréquences différentes Figure 6. Prenons une référence de bruit b₁(t) ayant le même contenu fréquentiel Figure 7.

Les Figures 8, 9 et 10 représentent le signal après chaque itération. Cette simulation permet de vérifier que la fréquence dominante du signal est bien atténuée à chaque itération.

4. TRAITEMENT DE CAS REELS

Les Figures 1 et 2 représentent respectivement les signaux de contrôle aux fréquences F₂ et F₁ d'un mètre de tube de générateur de vapeur. Le transitoire observé voie y (de F₂) est caractéristique

de la présence d'une plaque intercalaire (élément du générateur de vapeur). L'importance du bruit sur la voie x de F₂ ne permet pas de donner un diagnostic sur l'état de cet élément. La Figure 3 présentant le signal de combinaison entre F₂ et F₁ après un apprentissage (calcul de la matrice M) sur les cinquante premiers centimètres du tube donne un signal caractéristique d'une plaque saine.

Le résultat de l'opération de corrélo-filtrage "modifié" (Figure 11) est obtenu par un traitement voie à voie entre les signaux de fréquence de contrôle F₂ (signal bruité) et les signaux de fréquence de contrôle F₁ (bruit de référence).



5. CONCLUSION

Les restaurations obtenues par les deux méthodes sont tout à fait comparables et répondent aux problèmes posés par les experts du contrôle. Contrairement aux combinaisons de fréquences applicables aux cas particuliers de signaux complexes (Courants de Foucault) le corrélo-filtre peut s'appliquer à n'importe quel type de signal perturbé par un bruit composé d'un nombre limité de raies (application aux machines tournantes).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] D. BAUDOIS - A. SILVENT - W. KOFMAN :
Etude théorique et expérimentale du corrélo-filtre
8ème colloque GRETSI - Juin 1981 - Nice
- [2] D. BAUDOIS - A. SILVENT :
Application du corrélo-filtre à l'élimination de raies en présence de bruit stationnaire
7ème colloque GRETSI - Juin 1979 - Nice
- [3] C.K. SWORD - M. SIMAAN :
Estimation of mixing parameters for cancellation of discretized Eddy current signals using time and frequency domain techniques
Journal of Non destructive Evaluation, Vol. 5 N° 1 - 1985
- [4] Y. POUPEAU :
Traitement des signaux de contrôle "Courants de Foucault"
Amélioration du rapport signal sur bruit
Rapport interne E.D.F., Mars 1987 - N° HP21/87/03 - CHATOU
- [5] B. WIDROW - S.D. STEARNS :
Adaptive signal processing
Prentice-Mall Processing series, Englewood cliffs - New Jersey, 1985
- [6] M. BELLANGER :
Traitement numérique du signal.
Edition MASSON - Paris - 2ème Edition 1984
- [7] Les essais non destructifs par Courants de Foucault
Groupes des Laboratoires Saint-Denis, E.D.F., Support de cours
- [8] Etudes du bruit de fond géométrique des tubes laminés
Groupe de Laboratoires Saint-Denis, E.D.F., 1985
Rapport interne N° R85 596/OT 47510.
- [9] B. GEORGEL - I. TRIMAILLE
Amélioration du rapport S/B pour les contrôles par Courants de Foucault
Rapport interne E.D.F., Juin 1984, N° HP/126/84/12

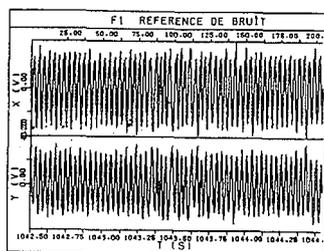
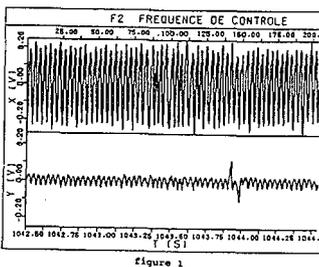


figure 2

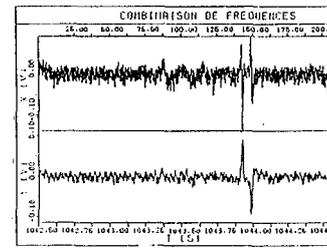


figure 3

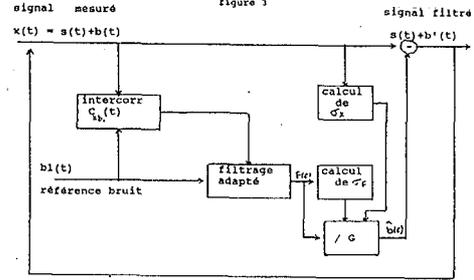


figure 4

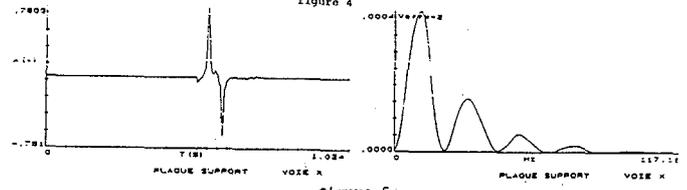


figure 5

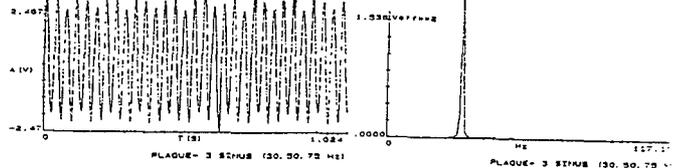


figure 6

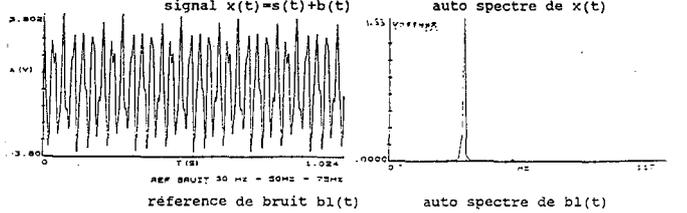


figure 7

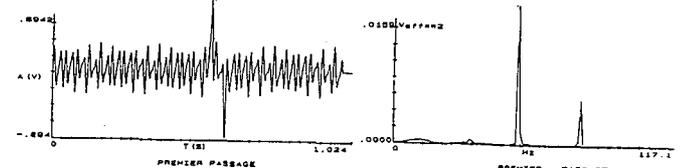


figure 8

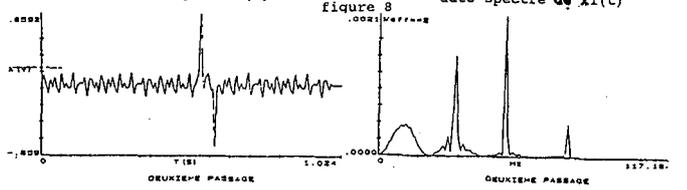


figure 9

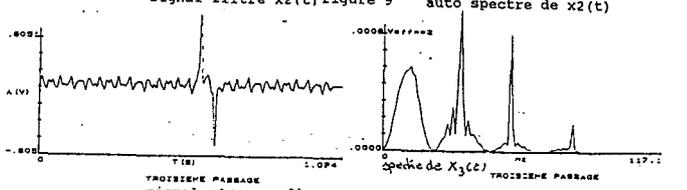


figure 10

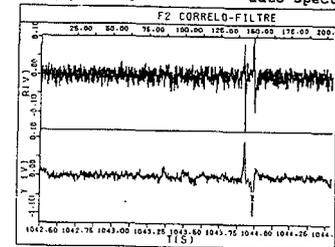


figure 11