



TRAITEMENT DES SIGNAUX DE CONTRÔLE  
PAR COURANTS DE FOUCAULT :  
COOPÉRATION NUMÉRIQUE/SYMBOLIQUE.

R. ZORGATI, B. GEORGEL,  
P. DUVAUT\*, T. DOLIGEZ\*, D. GARREAU\*

EDF/Études et recherches, BP 49, 78401 Chatou cedex

\*Kurtosis Ingénierie S.A., 27, av. de la Constellation BP9295, 95802 Cergy-Pontoise cedex

RÉSUMÉ

ABSTRACT

La coopération entre la programmation procédurale, le "numérique", et la programmation déclarative, le "symbolique", permet de conférer à des systèmes de traitement de l'information une autonomie remarquable vis-à-vis de décisions complexes traditionnellement prises par des humains. Nous illustrons notre propos dans le contexte du contrôle par courants de Foucault des tubes de générateurs de vapeur avec les résultats de la maquette logicielle Extracsion®.

In this paper we present the problem of cooperation between numerical and symbolical programming. This cooperation enables an efficient substitution of some human based decisions. This approach is applied to Eddy current testing of steam generator tubes. We illustrate our purpose with results obtained with the mock-up Extracsion®.

## 1. INTRODUCTION

L'amélioration du contrôle non destructif par courants de Foucault des tubes de générateurs de vapeur passe par l'automatisation de la chaîne de traitement des signaux de mesure. Le traitement numérique du signal prend une large part dans cette automatisation mais doit être associé à des techniques "symboliques", plus appropriées pour la définition d'une stratégie de traitement, un choix d'algorithmes ou un réglage de paramètres. Cette coopération, dans le contexte du contrôle des tubes, entre les programmations procédurale et déclarative est à la base du logiciel EXpert de TRaitement, d'Analyse et de Classification des SIGnaux d'Origine Nucléaire Extracsion. Elle lui confère un degré d'automatisme remarquable. Les résultats obtenus avec ce système pour la restauration automatique de signaux illustrent notre propos.

## 2. AUTOMATISATION DES TRAITEMENTS

L'opération de diagnostic est actuellement assurée par un expert humain. Pour gagner en productivité, il est nécessaire d'automatiser cette opération délicate. Le logiciel Extracsion permet d'établir automatiquement des diagnostics sur l'état des tubes de générateurs de vapeur contrôlés par courants de Foucault. Des bruits, d'origines diverses, altèrent les signaux de contrôle. En particulier, le bruit de laminage, dû au procédé de fabrication des tubes, affecte le plus gravement les signaux au point de compromettre, dans certains cas, l'opération de diagnostic. Extracsion dispose de deux modules de traitement : un module de restauration des signaux et un module de diagnostic. On se focalise ici sur le module de restauration des signaux vis-à-vis du bruit de laminage (cf. [1] pour une présentation complète du logiciel Extracsion et en particulier de son module de diagnostic automatique).

Dans ce contexte, le problème de l'automatisation d'une chaîne de traitement des signaux de contrôle consiste à définir comment le système sera



autonome vis-à-vis de décisions traditionnellement dévolues à un spécialiste en traitement du signal. Ainsi, pour être autonome, le système doit pouvoir "répondre" aux questions suivantes :

- . Q1 : le signal nécessite-t-il une restauration ?
- . Q2 : si oui, quelle technique faut-il utiliser ?
- . Q3 : après traitements, l'opération de restauration est-t-elle un succès ?
- . Q4 : que faire en cas d'échec ?

Les réponses à ces questions sont des décisions de haut niveau établies en deux étapes : les techniques numériques calculent un certain nombre de paramètres sur les signaux; ces paramètres sont alors manipulés dans un contexte de plus haut niveau par les techniques symboliques. Ceci permet de définir facilement la nature numérique ou symbolique des traitements qui seront réalisés : tout ce qui est indiscutable, hors contexte, sera assuré par des traitements numériques; le traitement symbolique étant alors réservé aux aspects décisionnels, à tout ce qui serait discutable, évolutif, moins certain. De plus, cette séparation confère au système une bonne évolutivité.

### 3. TRAITEMENTS NUMÉRIQUES ET SYMBOLIQUES

Nous supposons à ce stade que seul le bruit de laminage affecte encore les signaux, les autres bruits ayant été éliminés. Le choix des paramètres à estimer a été réalisé a priori (on pourrait dans un second temps laisser à un module expert le soin de choisir les paramètres pertinents d'un signal en fonction des objectifs assignés). Les réponses aux questions 1 à 4 ci-dessous sont élaborées de la façon suivante :

. Réponse 1 :

Le bruit de laminage est majoritairement un bruit bande étroite. Dire qu'un signal est bruité ou non consiste dans un premier temps à mesurer le rapport des contributions en puissance entre les parties bande étroite et large bande du signal. Pour ce faire, on mesure la différence entre l'autocorrélation en

zéro du signal et sa valeur maximale atteinte sur une zone qui ne contient pas l'échantillon de retard zéro. Pour disposer d'un critère plus consistant, on mesure aussi un rapport signal sur bruit. Les transitoires étant supposés les zones de signal utile, le rapport signal sur bruit dans notre cas est une estimée du rapport des puissances des zones de transitoires et des zones hors transitoires. Notons  $R_0(b_e/l_b)$  le ratio des contributions bande étroite et large bande et  $R_0(s/b)$  le rapport signal sur bruit *avant* restauration. Le critère de décision est le suivant :

*" Si  $R_0(b_e/l_b)$  excède un certain niveau  $S1$  et si  $R_0(s/b)$  ne dépasse pas un certain niveau  $S2$ , alors le signal doit être restauré vis-à-vis du bruit de laminage "*

. Réponse 2 :

Le contrôle par courants de Foucault des tubes est effectué à trois fréquences :  $F1=500$  kHz,  $F2=240$  kHz et  $F3=100$  kHz. En vertu du phénomène de peau régissant le comportement d'une onde électromagnétique dans un milieu conducteur, le signal à la fréquence  $F1$  est sensible principalement à la paroi interne du tube. Or ce sont les irrégularités de cette paroi interne qui génèrent le bruit de laminage. Donc le signal à la fréquence  $F1$  peut potentiellement servir de référence de bruit. Ainsi, la restauration d'un signal de contrôle est réalisée par soustraction d'une estimée du bruit de laminage. Selon que cette estimation est obtenue à partir du signal lui-même ou d'un autre signal considéré comme référence de bruit, on restaure par auto-égalisation ou par égalisation croisée respectivement. En phase d'apprentissage, l'algorithme utilisé est le gradient stochastique pour l'auto-égalisation et les moindres carrés récursifs pour l'égalisation croisée [2]. Notons AE et EC les algorithmes d'auto-égalisation et d'égalisation croisée respectivement. La règle de décision concernant la seconde question est la suivante :

*"Si la restauration de  $F1$  est nécessaire, alors seule la technique AE est applicable. Si la restauration de  $F2$  et/ou  $F3$  est requise, alors l'algorithme EC est applicable si  $F1$  a les propriétés requises pour*

*servir de référence de bruit sinon c'est l'algorithme AE qui sera appliqué."*

F1 peut servir de référence de bruit si F1 et F2 et/ou F3 ne sont pas corrélés.

. Réponse 3 :

Notons  $R_{(be/lb)}$  le ratio des contributions bande étroite et large bande et  $R_{(s/b)}$  le rapport signal sur bruit après restauration. Soient  $\Gamma$  et  $\Psi$  les rapports définis par :

$$\Gamma = \frac{R_{(be/lb)}}{R_0} \in ]0,1] \quad , \quad \Psi = \frac{R_{(s/b)}}{R_0} \geq 1$$

La restauration est considérée comme réussie ainsi :

*" Si la contribution bande étroite du signal après restauration a décru c'est-à-dire si  $I \leq \alpha = 0.9$  et si le rapport signal sur bruit a augmenté d'au moins 3dB c'est-à-dire si  $\Psi \geq \beta = 2$ , alors la restauration a réduit les effets du bruit de laminage".*

Notons que les facteurs  $\alpha$  et  $\beta$  peuvent s'interpréter comme des facteurs de rendement des algorithmes AE et EC.

Un exemple de restauration automatique d'un signal est donné ci-dessous :

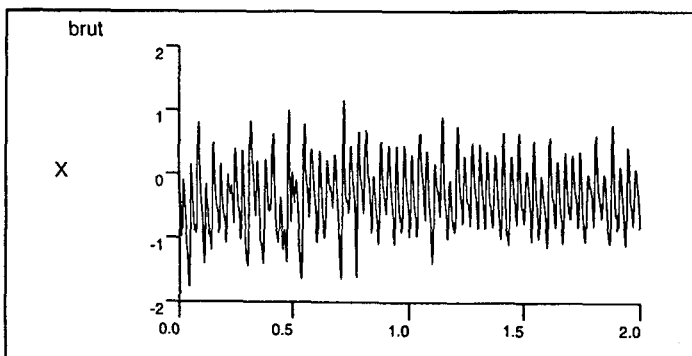


Figure 1 : un signal de contrôle où l'information utile (ici un signal de plaque) est noyé dans le bruit de laminage.

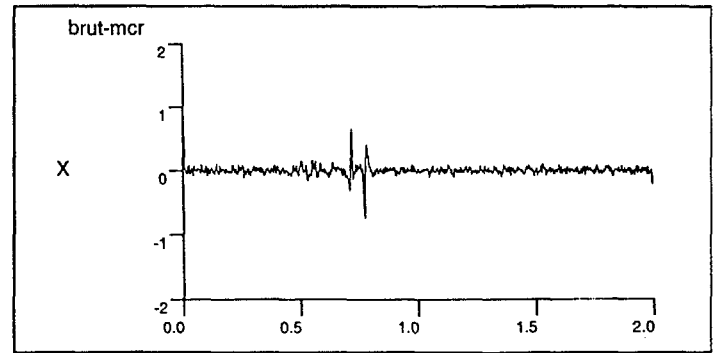


Figure 2 : le même signal restauré de façon automatique : l'information utile est recouvrée. Le processus de restauration est un succès ( $\Gamma=0.6$  et  $\Psi=6.5$ , soit un gain d'environ 8 dB).

. Réponse 4 :

Si au contraire l'opération de restauration n'a pas réussi, une seconde tentative est menée :

*" Si la restauration est un échec avec l'algorithme EC lorsque celui-ci est requis, alors tenter la restauration avec l'algorithme AE. Dans tous les cas, si l'échec est prononcé, poursuivre les traitements avec le signal avant toute restauration".*

#### 4. LE RÉGLAGE AUTOMATIQUE DE PARAMÈTRES

Avec les algorithmes choisis, les résultats obtenus en restauration dépendent du bon réglage des paramètres comme l'ordre  $N$  et le facteur d'oubli  $\lambda$ . Pour tenir compte de contraintes industrielles, nous avons préféré pour cette étude fixer simplement ces paramètres d'après un grand nombre de simulations. Classiquement, nous aurions pu considérer ordre et facteur d'oubli comme hyperparamètres et appliquer la démarche préconisée et mise en œuvre dans [3], [4], [5] pour une estimation optimale au sens du maximum de vraisemblance. Nous exposons ci-dessous une démarche, non testée, fondée sur la formalisation d'un discours d'expert en traitement du signal et son exploitation dans le cadre d'un raisonnement hypothétique.



Dans un premier temps, des critères permettant d'apprécier les résultats de restauration et le comportement des algorithmes utilisés sont définis. Dans notre cas, quatre critères sont définis après restauration :

- C1 : décroissance suffisante de la contribution bande étroite du signal,
- C2 : augmentation suffisante du rapport signal sur bruit,
- C3 : faible erreur de prédiction,
- C4 : vitesse de convergence de l'algorithme significative.

Le réglage des paramètres est jugé correct si les quatre critères sont simultanément satisfaits, sinon un des paramètres (ou plusieurs) est mal réglé. Une séquence binaire de longueur  $n=4$  est construite d'après la satisfaction aux  $n$  critères : "1" si le critère est satisfait, "0" sinon : ainsi, le réglage des paramètres est correct si la séquence d'évaluation, notée  $\Omega$ , vaut (1,1,1,1), l'ordre d'évaluation de gauche à droite est C1 à C4. Pour les  $2^{n-1}$  cas de mauvais réglages, un expert du comportement des algorithmes recense toutes les hypothèses possibles permettant d'expliquer la séquence. Par exemple, si  $\Omega=(1,1,0,1)$ , autrement dit si l'erreur de prédiction n'est pas suffisamment faible, l'hypothèse avancée par l'expert est la suivante : "le facteur d'oubli est trop faible (manque de précision)". Dans ce cas, le traitement est répété avec un facteur d'oubli plus élevé. La séquence (1,1,0,0) donne lieu à la correction suivante : "il y a des problèmes de poursuite : la convergence est lente et on observe un manque de précision. Diminuer la valeur du facteur d'oubli".

Pour les hypothèses multiples, les techniques de raisonnement hypothétique permettent une gestion efficace de la combinatoire. Ce problème est d'autant plus difficile lorsque le nombre de critères augmente mais reste pour ce type d'applications tout à fait raisonnable. Certains générateurs de système expert comme Smeci® sont particulièrement adaptés à ce genre de problèmes.

L'opération de restauration est ainsi répétée jusqu'à l'obtention de la séquence de sortie (1,1,1,1).

## 5. CONCLUSION

Pour des questions de sûreté et de productivité, le contrôle non destructif par courants de Foucault des tubes de générateurs de vapeur doit être automatisé. Dans cette optique, nous avons développé la maquette logicielle Extracsion. Grâce à la coopération du numérique et du symbolique, l'intégration dans un contexte industriel de certains algorithmes sophistiqués du Traitement du Signal est réussie. Les résultats obtenus en mode entièrement automatique sont probants et incitent à approfondir cette approche et à la formaliser.

## RÉFÉRENCES

- [1] **Georgel, Zorgati** : "EXTRACSION : a system for automatic Eddy Currents diagnosis of steam generator tubes in nuclear power plants", Proceedings of the 13<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing, São Paulo, Brazil, 18-23 October 1992, Volume 1, 278-282.
- [2] **Duvaut** : "Traitement du signal. Concepts et applications". Hermès Éd., Paris 1991.
- [3] **Houacine, Demoment** : "Approche bayésienne de l'analyse spectrale adaptative : modèles AR longs et filtrage de Kalman rapide". Traitement du Signal, volume 4 n°5, 389-397, numéro spécial 1987 modélisation-identification.
- [4] **Clergeot** : "Filter Order Selection in Adaptive Maximum Likelihood Estimation", IEEE Trans., IT-30, 1984, 199-210.
- [5] **Zugmeyer** : "Méthodes d'analyse spatio-temporelle de sources en mouvement". Thèse de doctorat de l'Université de Rennes I, Juillet 1992, Chapitre 8.

Smeci® est un produit d'ILOG.