

## LA SÉPARATION DE SOURCES APPLIQUÉE AU DÉBRUITAGE EN CND PAR COURANTS DE FOUCAULT

L. CAI, R. ANIN

Électricité de France/Études et Recherches,  
6, Quai Watier, 78401 Chatou, FRANCE

### RÉSUMÉ

On présente une application industrielle de la technique de séparation de sources. Il s'agit du contrôle non destructif sur les générateurs de vapeur des centrales nucléaires.

L'objectif est d'éliminer le bruit de laminage. Les méthodes classiques ne fonctionnent que si l'on dispose d'une référence du bruit.

On propose l'approche multi-capteurs avec les méthodes de séparation de sources (la référence du bruit n'est plus nécessaire). Cette technique a été appliquée avec succès sur des signaux réels.

### 1. INTRODUCTION

Les générateurs de vapeur des centrales nucléaires sont contrôlés, à l'aide des sondes à Courants de Foucault, pour détecter des éventuels défauts dans les tubes. En effet, ces sondes sont tout simplement sensibles aux irrégularités du matériau, et révèlent ainsi la présence éventuelle des défauts qui modifie la régularité d'un tube.

Or, les tubes (fabriqués par laminage à froid) présentent des ondulations (irrégularités normales) sur la surface, et ceci correspond à un bruit dit de laminage qui peut perturber le contrôle et masquer les défauts. Il est impératif d'éliminer ce bruit pour rendre le contrôle possible.

Plusieurs voies de mesures sont disponibles simultanément. Parmi les méthodes étudiées jusqu'ici [2], les plus avancées (filtrage adaptatif, par exemple) se reposent sur l'utilisation d'une référence de bruit. En réalité, même si certaines voies contiennent majoritairement du bruit, on ne dispose pas vraiment de référence propre du bruit, ce qui limite les performances dans l'application de ces méthodes.

### ABSTRACT

This article presents an industrial application of the sources separation technique. It concerns the non destructive testing on steam generators of nuclear power plants.

The aim is to cancel the flattening noise. The classical methods operate only when a noise reference is available.

We propose to use the multi-sensor approach with the sources separation methods (the noise reference is not necessary). This technique has been applied successfully on real data.

On propose ici l'utilisation des méthodes de séparation de sources développées en traitement d'antenne. On considère que plusieurs types d'irrégularités (défaut, bruit de laminage) sont présents dans les tubes et se mélangent au niveau des mesures. On peut assimiler ces irrégularités à des sources excitatrices et supposer qu'elles soient statistiquement indépendantes entre elles. Le traitement multi-voies avec les méthodes de séparation nous permet de séparer les défauts et le bruit de laminage.

Le paragraphe 2 décrira les mesures en courants de Foucault et le modèle physique associé. Le paragraphe 3 concerne l'utilisation des méthodes de séparation de sources pour le débruitage. Dans le paragraphe 4, on présentera les résultats expérimentaux obtenus.

### 2. LES MESURES PHYSIQUES

Les courants de Foucault sont des courants électriques induits dans un matériau conducteur, lorsque ce matériau est baigné dans un champ magnétique variable. Dans notre cas, circule dans les bobines de la sonde un courant variable qui induit des courants de Foucault (CdF) dans le volume du tube à contrôler.



Une quelconque hétérogénéité du matériau perturbe le trajet des Cdf et engendre une modification de l'impédance de la bobine. Lorsque la sonde se déplace le long du tube, un système électronique délivre un signal complexe proportionnel à l'impédance qui enregistre toutes les irrégularités présentes dans le tube.

Le pouvoir de pénétration est en fonction de la fréquence du courant. Pour pouvoir observer des défauts à des différentes profondeurs, les bobines sont alimentées simultanément par 3 courants de fréquences égales à  $f_1$ ,  $f_2$  et  $f_3$ . On dispose ainsi de 3 voies de mesures complexes ( $X_{fn} + iY_{fn}$ ), soit 6 voies en réels.

Selon la modélisation utilisée à EDF [1], l'impédance  $Z_{k,h}$ , à la profondeur  $h$  pour la fréquence  $k$  ( $k=f_1, f_2$  ou  $f_3$ ), peut s'écrire comme la convolution entre le champ magnétique  $A_{k,h}$  et le profil  $S_h$  du tube à contrôler :

$$Z_{k,h} = A_{k,h} * S_h ,$$

On suppose qu'il y ait additivité des impédances lorsque l'on superpose deux types d'irrégularité. Cela conduit au modèle suivant:

$$\begin{aligned} Z_{k,Défaut} &= A_{k,D} * S_D, \\ Z_{k,Laminage} &= A_{k,L} * S_L \\ Z_k(n) &= Z_{k,Défaut}(n) + Z_{k,Laminage}(n) \\ \text{soit } Z_k &= A_{k,D} * S_D + A_{k,L} * S_L . \end{aligned} \quad (1)$$

L'élimination du bruit de laminage consiste à estimer à partir des mesures  $Z_k$  la composante liée au défaut, c.à.d.  $Z_{k,Défaut}$  ou  $S_D$ .

### 3. SÉPARATION DE SOURCES

#### 3.1 Modèle de mélange

La séparation de sources est une technique de traitement multi-capteurs. Lorsque chaque signal-capteur est un mélange additif de plusieurs composantes indépendantes (engendrées par les différentes sources), cette technique permet de séparer ces composantes.

Le modèle de mélange pour les signaux de capteurs est le suivant (avec  $M$  capteurs et  $P$  sources) :

$$Z_m = \sum_{i=1}^P A_{i,m} * S_i, \quad m \in [1, M], \quad (2)$$

avec  $S_i$  la  $i$ ème composante et  $A_{i,m}$  les coefficients de mélange (pour la  $i$ ème composante et le  $m$ ème capteur).

Ce système peut également s'écrire sous forme vectorielle :

$$\underline{Z} = \underline{A} * \underline{S}, \quad (3)$$

$$\text{avec } \begin{cases} \underline{Z} = [Z_1, \dots, Z_M]^T, \quad \underline{S} = [S_1, \dots, S_P]^T, \\ \underline{A} = [A_{i,m}]_{i \in [1, P], m \in [1, M]} \end{cases}$$

La plupart des méthodes de séparation fonctionnent uniquement avec un modèle simplifié (mélange instantané) où la convolution est remplacée par la multiplication :

$$\underline{Z} = \underline{A} \underline{S} \quad (4)$$

#### 3.2 La séparation de sources pour le débruitage

Les signaux-source  $S_i$  (ou excitations) sont supposés **indépendants entre eux**. La séparation de sources [3-5] est une technique permettant d'estimer ces excitations à partir des signaux-capteurs  $\underline{Z}$ , sans connaître les coefficients de mélange  $\underline{A}$ .

Nous pouvons constater que le modèle physique (1) rappelé dans le paragraphe 2 est similaire au modèle de mélange (2). Le défaut et l'ondulation de laminage sont des irrégularités distinctes et les signaux correspondants sont probablement indépendants entre eux. On peut donc procéder à l'estimation du signal de défaut  $S_D$  par séparation de sources.

Nous avons de multiples façons d'assimiler le modèle physique à un modèle de mélange. Par exemple avec 2 capteurs, on peut utiliser les couples ( $X_{f1}, Y_{f1}$ ), ( $X_{f1}, X_{f2}$ ) ou ( $X_{f1} + jY_{f1}, X_{f2} + jY_{f2}$ ) et avec 3 capteurs, les triplets ( $X_{f1}, X_{f2}, Y_{f1}$ ), ( $X_{f1}, X_{f2}, X_{f3}$ ). D'autres combinaisons sont également possibles. Le nombre de sources est a priori au moins égal à 2 : le signal utile et le bruit de laminage. Il peut y avoir plus de deux sources, car le signal utile peut être engendré par plusieurs excitations (plaques, défaut) et le bruit également.

#### 3.3 Algorithmes de séparation

Même si les signaux courants de Foucault suivent plutôt le modèle convolutif, il existe très peu de méthodes qui traitent proprement ce cas. Il semble que certaines méthodes fondées sur le modèle instantané peuvent quant même fonctionner sur ces signaux.

L'algorithme de Héault et Jutten [3] est adaptatif et facile à mettre en oeuvre. Mais la convergence est lente et les signaux courants de Foucault ne sont pas stationnaires sur de longue durée. De plus H-J est très sensible au bruit de capteurs. C'est probablement pourquoi nous n'avons pas réussi à maîtriser la convergence de l'algorithme.

Les essais avec l'algorithme de Cardoso [4] sont une réussite. Les résultats présentés dans le paragraphe suivant ont été obtenus avec cette méthode.

Les études plus récentes ont montré que d'autres méthodes comme SOBI (Second Order Blind Identification) [5] peuvent également être utilisées.

#### 4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les essais ont été effectués sur les signaux de 5 tubes de générateur de vapeur et 2 tubes-maquette. Les figures suivantes correspondent aux signaux de contrôle de générateurs de vapeur.

Les résultats sont généralement spectaculaires avec une nette amélioration du rapport signal sur bruit. Certains défauts cachés peuvent ainsi être mis en évidence. La figure 1 est une illustration de cet effet. Nous avons utilisé deux voies réelles  $X_{f1}$  et  $X_{f2}$  comme entrées (à gauche). Le traitement réalise la séparation entre le signal utile et le bruit (à droite). Le défaut qui était invisible dans les signaux bruts a été démasqué.

Quelques comparaisons ont été réalisées.

On montre notamment l'avantage de la séparation de sources par rapport au filtrage adaptatif (Moindres Carrés Récurifs). La figure 2 permet d'illustrer cette différence. MCR atténue le bruit et fait apparaître le défaut (vers 7500), mais il génère également des transitoires parasites qui ressemblent au défaut. Par contre, la séparation de sources a bien fonctionné. Le dysfonctionnement de MCR est dû au fait que la voie  $X_{f1}$ , utilisée comme référence de bruit, n'est pas une référence parfaite du bruit à cause de la présence du signal.

On confirme également la croissance de la performance avec l'augmentation du nombre de voies. Le niveau du bruit résiduel obtenu avec 4 capteurs est plus faible qu'avec 2 capteurs.

On a essayé par ailleurs de traiter directement les signaux complexes (mesures d'impédance). Mais les essais montrent qu'avec les mêmes signaux en entrée,

le gain en S/B est moins élevé avec le traitement en complexe. Par exemple, il vaut mieux considérer 4 capteurs réels ( $X_{f1}$ ,  $Y_{f1}$ ,  $X_{f2}$ ,  $Y_{f2}$ ) que 2 capteurs complexes ( $X_{f1}+jY_{f1}$ ,  $X_{f2}+jY_{f2}$ ). C'est probablement dû au fait que l'impédance mesurée n'est pas un signal analytique.

#### 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous pouvons conclure que l'élimination du bruit de laminage par séparation de sources est faisable. Le rapport signal sur bruit peut être nettement amélioré par ce traitement et les défauts de faibles amplitudes peuvent être rendus visibles.

Les essais ont été réussis avec la méthode de Cardoso sur 5 tubes de GV et de 2 tubes-maquette. L'étude se poursuit actuellement sur la comparaison des algorithmes et sur l'évaluation des performances.

#### RÉFÉRENCES

- [1] C. Concy  
*Modélisation des bruits par une convolution unidimensionnelle*  
Note interne EDF/DER HP-21/94/007, 1994
- [2] Y. Poupeau  
*Amélioration du rapport signal sur bruit des signaux de contrôle par courants de Foucault des tubes de générateurs de vapeur des centrales nucléaires*  
Thèse de Doctorat P. & M. CURIE, 1988,  
Note interne EDF/DER HP21/89-25
- [3] Jutten & Héault  
*Blind Separation of Sources, Part I : An Adaptive Algorithm Based on Neuromimetic Architecture*  
Signal Processing, EURASIP, vol. 24, No.1, 1991
- [4] J.F. Cardoso  
*Localisation et identification par la quadricovariance*  
Traitement du signal, volume 7 n°5 spécial, 1990
- [5] A. Belouchrani and K. Abed Meraim  
*Séparation aveugle au second ordre de sources temporellement corrélées*  
Proc. GRETSI, Juan-les-Pins, sept. 1993.

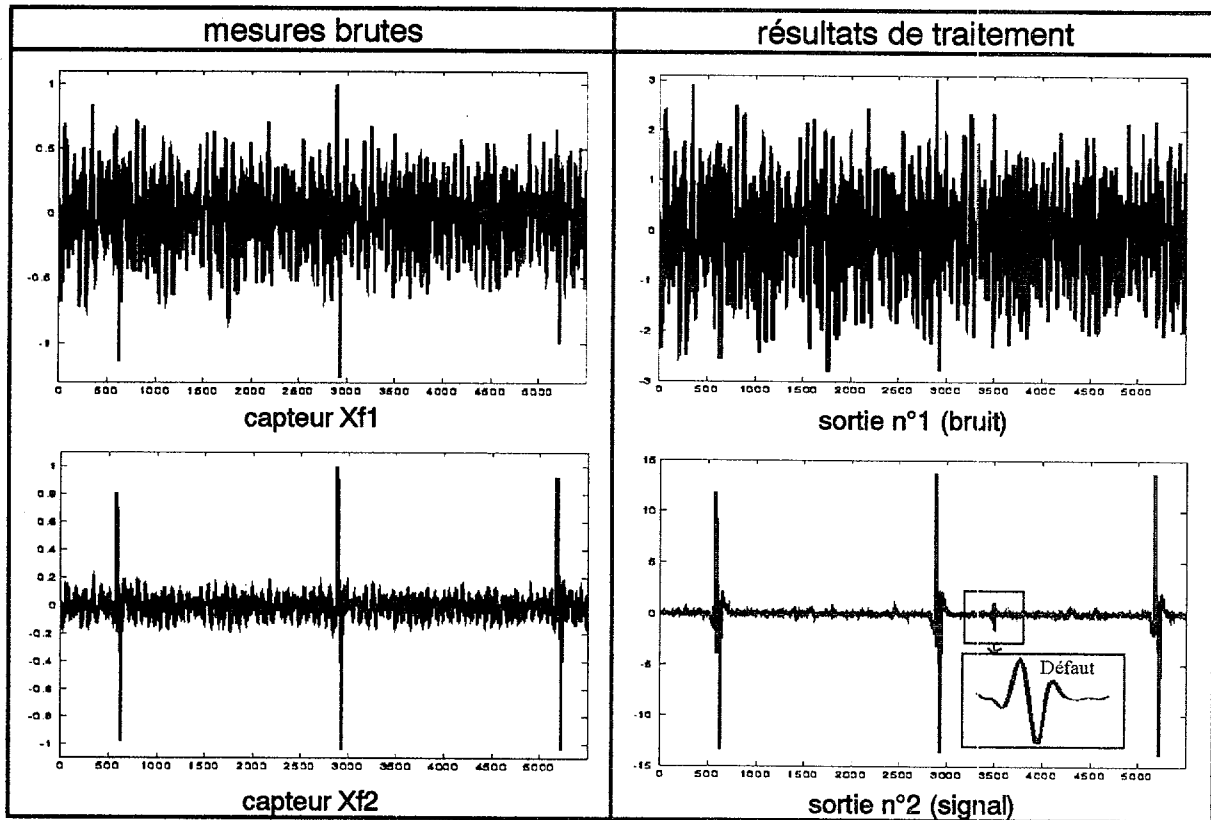


Figure 1 : exemple de traitement par la séparation de sources

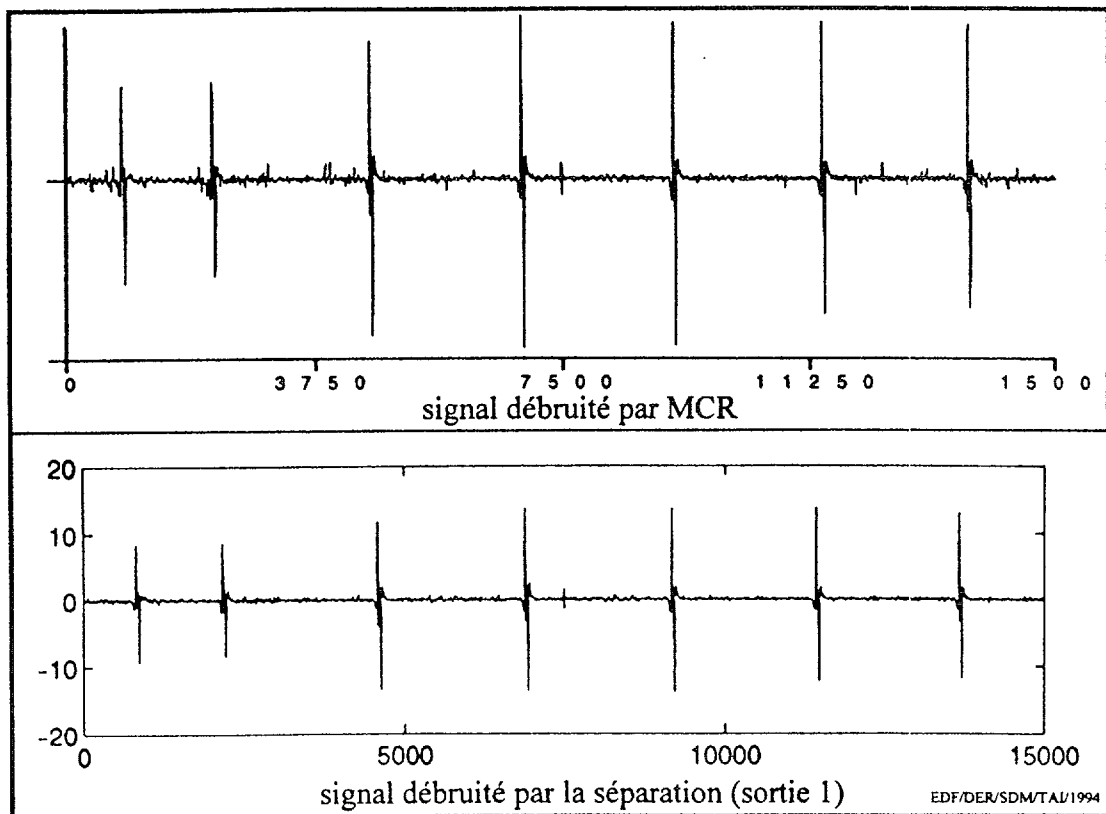


Figure 2 : Comparaison entre la séparation de sources et le filtrage adaptatif (MCR)