

Traitement des signaux Courants de Foucault pour le contrôle des tubes de générateurs de vapeur dans les centrales nucléaires REP

Eddy currents signal processing for steam generator inspection in PWR nuclear power plants



Bruno GEORGEL

E.D.F. — Études et Recherches
Dépt. Surveillance, Diagnostic,
Maintenance
6 quai Watier BP 49
78401 Chatou Cedex

Ancien élève de l'École Supérieure de Physique et de Chimie de Paris, D.E.A. Électronique et Instrumentation (Paris VI).
Responsable à Électricité de France d'un groupe d'étude sur le Traitement du Signal, la Reconnaissance de Formes et le Traitement d'Image, avec des Applications en Surveillance des matériels et en Contrôle Non Destructif des matériaux dans les Ensembles de Production d'Électricité.
Domaines d'intérêt : analyse spectrale, détection/estimation, logiciels de traitement du signal.
Président du « Club des Partenaires » du Groupement de Recherche TdSI (CNRS), membre senior de la S.E.E., membre du Comité de Direction de la revue TS.

RÉSUMÉ

Les tubes des échangeurs de chaleur que sont les générateurs de vapeur des centrales nucléaires, sont contrôlés périodiquement à l'aide d'une sonde à Courants de Foucault.

La sonde délivre un signal **complexe** (2 composantes), contenant à la fois des **événements** prévisibles (dudgeonnage, plaques, cintres...), du **bruit** (d'origine principalement métallurgique) et des **signaux** représentatifs de l'état du tube (défauts éventuels).

Ces signaux transitoires, aléatoires en temps d'arrivée et en forme, doivent être **détectés**, puis **caractérisés**, avant d'alimenter les étages de haut niveau d'un système de **diagnostic**.

Les exigences actuelles de qualité et d'efficacité économique conduisent à développer un système de contrôle largement **automatique**, capable de

gérer environ 1 Méga-octets de données par tube contrôlé et de proposer au contrôleur, en quelques minutes, des diagnostics fiables.

Cet objectif nécessite de mettre en œuvre plusieurs techniques de **traitement du signal numérique** : détection, segmentation, estimation, soustraction de bruit, filtrage adaptatif, modélisation, paramétrisation, classification.

Nous examinerons dans cet article quelques-uns des traitements étudiés.

MOTS-CLÉS

Contrôle non destructif, générateurs de vapeur, tubes, courants de Foucault, filtrage, soustraction de bruit, détection, classification.

ABSTRACT

Steam generator tubes in nuclear power plants are periodically checked by means of eddy current probes. The output of a probe is composed of three types of signals : known events (rolling zone, support plates, U-bend part), noise (mainly metallurgical noise) and possible flaws. The latter are random transients, both in arrival time and in shape : they have to be detected and then estimated, before to be fed to the high level stages of a diagnostics system.

The objective of the study presented is to develop a semi-automatic system, which could manage and process more than 1 M-bytes of data per tube and

provide an operator with reliable diagnostics proposals within a few minutes. This can be achieved only by cooperation of several digital signal processing techniques : detection, segmentation, estimation, noise subtraction, adaptive filtering, modelisation, pattern recognition.

The paper describes some of these items.

KEY WORDS

Non destructive testing, steam generator, tubes, eddy currents, filtering, noise subtraction, detection, pattern recognition.

AVERTISSEMENT ET REMERCIEMENTS

Un exposé aux Journées « Traitement du Signal en mécanique » en mars 1990 reposait sur une première version de cet article. Il en a été tiré un texte, très court, sur l'utilisation du corrélo-filtre, qui est paru dans le Courrier du CNRS (numéro spécial Signaux et Images).

L'auteur tient à remercier D. Moysse, Y. Poupeau, M. Carré, F. Lefèvre, C. Cloarec, J. C. Benas, A. Tubiana et R. Zorgati, sans le travail et l'enthousiasme desquels cet article n'aurait pu voir le jour.

GLOSSAIRE

CND : contrôle non destructif
 REP : réacteur (nucléaire) à eau pressurisée
 GV : générateur de vapeur
 CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique.

1. Le contrôle des tubes de générateurs de vapeur

1.1. LE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF DANS LES CENTRALES NUCLÉAIRES

Le contrôle non destructif (CND) est un ensemble de techniques qui permettent de vérifier et de quantifier l'intégrité des matériaux utilisés dans l'industrie. On utilise, selon les problèmes, les ultrasons, l'émission acoustique, la radiographie, la thermographie, les Courants de Foucault.

Mettre en œuvre un contrôle non destructif implique de maîtriser la physique, l'instrumentation, la métrologie, et de plus en plus le traitement des données et la modélisation mathématique.

Le CND industriel est proche des méthodes utilisées dans le domaine médical (échographie, tomographie, IRM...) et pose les mêmes problèmes d'interprétation.

Les techniques principales du CND sont toutes utilisées dans les centrales nucléaires. Intéressons-nous maintenant au contrôle des générateurs de vapeur.

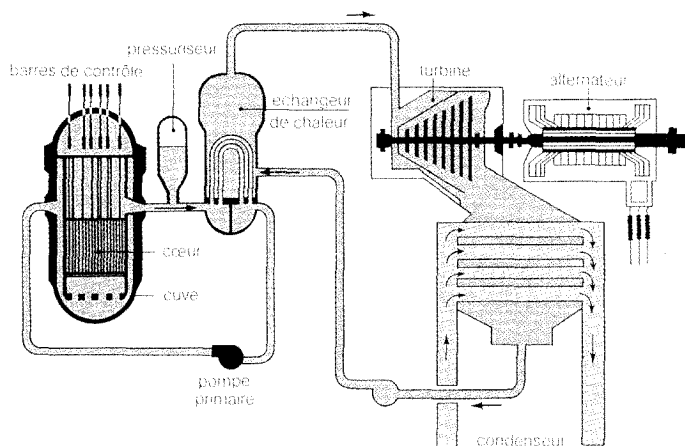


Fig 1. — Schéma de principe d'une centrale nucléaire : le contrôle de tubes est fait dans l'échangeur de chaleur (GV).

L'échange de chaleur entre les circuits primaire et secondaire des centrales nucléaires à eau pressurisée s'effectue dans le *générateur de vapeur (GV)*. Cet échangeur est formé de plusieurs milliers de tubes métalliques en U, de diamètre 22 mm, d'épaisseur 1,3 mm et de hauteur 10 m. Une *tranche 900 MW* (qui correspond à un réacteur REP), contient 10 164 tubes, d'une longueur totale de 230 km (fig. 1 et 2).

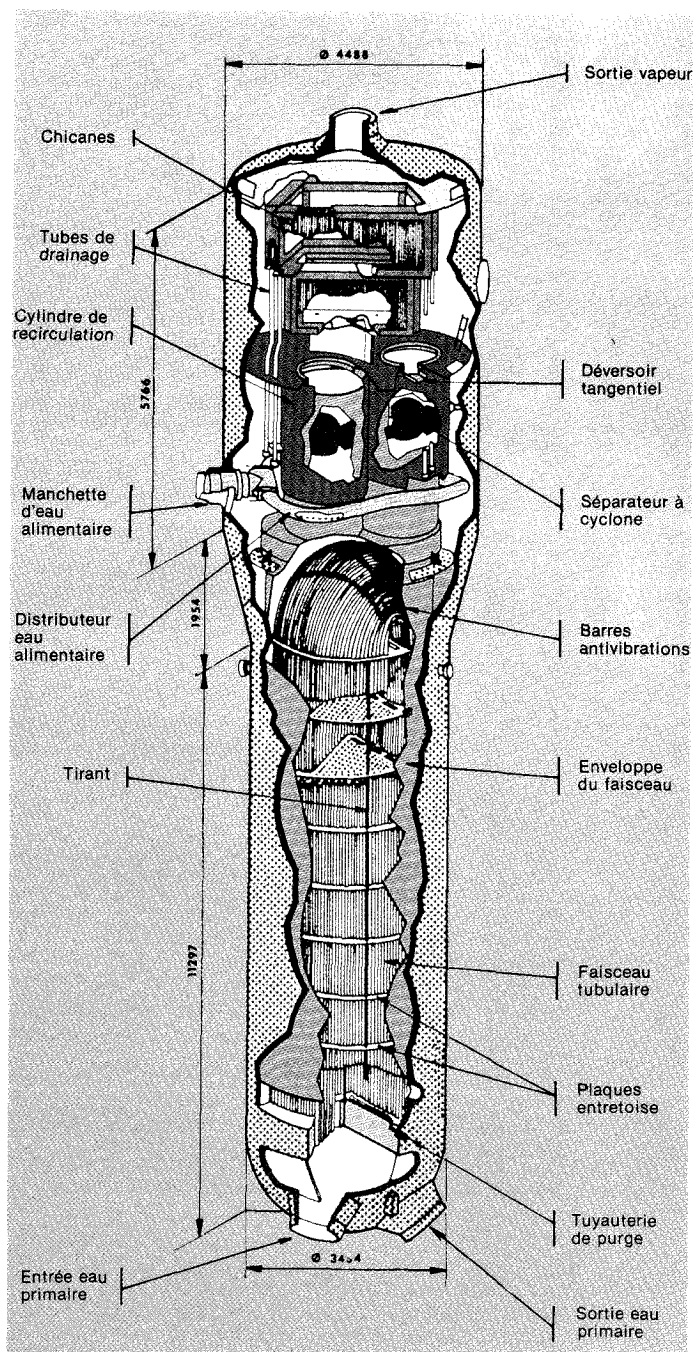


Fig. 2. — Générateur de vapeur.

Leur contrôle est indispensable, car l'intégrité des tubes assure qu'il n'y aura pas de transfert de matière radioactive et prévient la baisse de pression dans le primaire qui aurait des conséquences graves. Si un défaut est détecté dans un tube, et s'il dépasse une taille critique, le tube est bouché. Ne pas détecter un défaut est interdit (problème de sûreté nucléaire), mais les fausses alarmes sont économiquement nuisibles, puisqu'elles conduisent à se priver de tubes qui auraient permis l'échange de chaleur.

Les contrôles sont effectués par des sociétés spécialisées, respectant une *procédure de contrôle* précise. A l'heure actuelle, l'interprétation est encore confiée à des opérateurs et supervisée par les experts du Groupe des Laboratoires d'EDF, mais on commence à automatiser les étages « amont » du contrôle : déplacement de la sonde, acquisition des signaux, stockage... En particulier, on *numérise* les signaux (1 ou 2 kHz d'échantillonnage, 12 bits de quantification) et on les inscrit sur disque optique (DON).

Les caractéristiques des contrôles conduisent à un flot d'environ 1 million de valeurs par tube : il faut ainsi quatre semaines à une équipe de 40 personnes travaillant en 2 postes, pour contrôler les 3 générateurs de vapeur d'une tranche REP 900 MW. L'enjeu est donc considérable et l'automatisation laisse espérer des gains importants, à la fois en raccourcissant les durées d'immobilisation des matériels et en augmentant la confiance dans les résultats. Le coût du contrôle est de 2 MF par tranche et par an (chiffres de 1986).

1.2. LE CONTRÔLE PAR COURANTS DE FOUCAULT

Le contrôle par courants de Foucault est indiqué pour les matériaux métalliques conducteurs. Il repose sur l'induction de courants électriques dans la masse d'un conducteur.

Le principe du contrôle [1, 2] est donc d'injecter dans une bobine (la sonde) un courant variable, en l'occurrence périodique. Celui-ci crée un champ magnétique, dont le flux varie : il induit donc dans le matériau à contrôler des courants, dont l'effet est de contrecarrer le phénomène qui leur a donné naissance (loi de Lenz).

L'ensemble « sonde + matériau en vis-à-vis » présente alors une impédance Z_0 , que l'on peut mesurer aux bornes de la bobine (rapport tension/courant). Si l'on place maintenant la sonde devant une zone présentant un défaut, les lignes de courant induit seront modifiées et l'impédance deviendra Z . La mesure de la variation de l'impédance fournira une « image » de la perturbation du matériau, c'est-à-dire du défaut.

En théorie, nous sommes typiquement face à un problème inverse, puisque l'on cherche à remonter à la dégradation subie par le tube, à partir du signal de contrôle. En pratique, actuellement, le traitement ne va pas jusqu'à restituer la forme et la taille du défaut.

La perturbation de l'impédance de la sonde peut être due à :

- * un événement attendu : *dudgeonnage, plaques, cintres*
- * du *bruit métallurgique*
- * un *défaut* (fissure longitudinale ou transversale...).

Bien entendu, la sonde n'est pas ponctuelle (elle est constituée de deux bobines) et le contrôle aura donc une résolution de l'ordre de l'entrefer, à savoir 0,5 mm.

1.3. LES CARACTÉRISTIQUES DU SIGNAL ET DU BRUIT

Pour chaque position de la sonde dans le tube, on mesure un nombre complexe qui n'est autre que la valeur de l'impédance, à la fréquence de contrôle (selon les cas F_A, F_1, F_2, F_3). Si la sonde est déplacée le long du tube (la vitesse est d'environ $0,5 \text{ m.s}^{-1}$), on récupère une suite de valeurs complexes, c'est-à-dire un signal complexe $Z(l)$, dont l'indice est la coordonnée spatiale l . Les opérateurs ont l'habitude de tracer en Lissajous ce signal ($Y = f(X)$) avec $Z = X + iY$). Si on suppose que la vitesse de la sonde dans le tube est constante, alors la coordonnée l peut être remplacée par le temps t et le signal est temporel complexe.

Ceci est un point intéressant, dans la mesure où le traicteur de signal a l'habitude de rencontrer des grandeurs complexes, bien sûr dans le domaine fréquentiel, à travers le signal analytique également, mais pas sous la forme générale (non analytique) d'un signal temporel.

On sait que la répartition des courants dans un conducteur obéit à l'effet de peau, c'est-à-dire que leur profondeur de pénétration est inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence d'excitation. On tient compte de cette loi en injectant (en même temps) dans la sonde, 3 fréquences différentes, calculées pour examiner la face intérieure du tube, toute l'épaisseur et la face extérieure du tube (méthode CEA). Pour une tranche nucléaire 900 MW, les fréquences sont $F_1 = 500 \text{ kHz}$, $F_2 = 240 \text{ kHz}$, $F_3 = 100 \text{ kHz}$. La composante à F_A est un peu particulière puisqu'elle correspond à la sortie d'une seule bobine et non à la différence de deux bobines comme les autres composantes. On se gardera bien sûr de confondre les fréquences d'excitation de la sonde F_1, F_2, F_3 (de l'ordre de quelques centaines de kHz), avec les fréquences physiques d'apparition des phénomènes le long d'un tube (de l'ordre de la centaine de Hertz et dépendant de la vitesse de déplacement de la sonde). En un mot, il s'agit donc d'un *contrôle multi-voies* et multi-spectral.

En amont du numériseur, un pont de mesure et une démodulation permettent d'extraire les deux composantes en phase et en quadrature du signal.

2. Origine des défauts rencontrés et remèdes

Les dégradations pouvant survenir dans les tubes sont causées par les contraintes qu'ils subissent :

- * pression élevée dans le primaire
- * différences de température
- * contraintes résiduelles de fabrication (dressage, cintrage, dudgeonnage).

Certains remèdes existent : par exemple, le traitement thermique de détensionnement, le grenailage et le DAM (dudgeonnage amélioré mécaniquement).

Les principales avaries pouvant être rencontrées sont [3] :

- * les fissurations par corrosion sous contrainte à partir de l'extérieur du tube
- * les amincissements au voisinage de la plaque tubulaire ou des cintres
- * la corrosion intergranulaire (décohésion des joints de grain en l'absence de tout effort mécanique)
- * des piqûres
- * des fissures amorcées de l'intérieur (corrosion sous contrainte, dans l'eau pure).

Il convient de dire un mot du bruit. Le bruit a au moins deux origines distinctes. En premier lieu le **bruit habituel**, de nature **électronique**, large bande. Deuxièmement, le **bruit métallurgique** dont la cause est à rechercher dans le procédé de fabrication des tubes (laminage). Il se produit à cette occasion une irrégularité d'état de surface sur l'intérieur du tube, qui est vue par la sonde comme une fluctuation et qui gêne la détection et l'estimation des signaux de défauts. Nous verrons plus loin que ces deux types de bruit demandent des traitements différents.

Les défauts potentiels sont à attendre dans certaines zones privilégiées du G.V. Le *contexte* d'un traitement est donc important ; en effet le bruit métallurgique n'est pas présent de la même façon dans toutes les zones du tube, les plaques-entretoises sont attendues à certains endroits connus, le type de défaut à prévoir dépend de la zone examinée, etc... Nous exploiterons cette notion de contexte dans le dernier chapitre de cet article.

Notre propos sera centré sur une sonde particulière (la **sonde axiale** ou SAX) et non pas sur la sonde tournante longue (ou STL), qui pose des problèmes différents et concerne une zone particulière des tubes. De même, nous nous intéresserons surtout aux *parties droites* des tubes, qui contiennent les plaques-entretoises, jusqu'avant la partie cintrée et qui sont perturbées dans la plupart des GV par du bruit métallurgique qu'il faudra atténuer.

3. Les traitements en cours de développement

A l'heure actuelle, les contrôles sont largement « manuels », en ce sens que la détection des signaux critiques, puis leur interprétation, sont faites par des opérateurs. Les fonctions électroniques elles-mêmes (génération des excitations, filtrages, démodulation...) sont réalisées en analogique, par des matériels spécifiques.

Depuis quelques années, des études sont faites, en laboratoire, pour améliorer certains aspects du contrôle et préparer de futurs systèmes automatiques [5].

Il faut être conscient des contraintes suivantes : la procédure de contrôle ne prend en compte les défauts qu'à partir d'un certain pourcentage de l'épaisseur du tube ; pour un même type, la forme du signal est éminemment

variable ; les banques de défauts sont difficiles à constituer, étant donné leur rareté et la démarche nécessaire pour accéder aux enregistrements ; les modélisations au moyen de codes de calcul (éléments finis par exemple) coûtent très cher [4].

Ceci donne une idée de la difficulté globale de la tâche qui consiste à développer un système automatique de contrôle. Dans un premier temps, on ne peut donc viser qu'un système « automatique par morceaux », fournissant une aide à l'expertise. De toutes façons la validation de tels logiciels vis-à-vis des procédures traditionnelles est indispensable et compliquée.

3.1. FILTRAGE PASSE-BANDE

Le bruit électronique peut être largement diminué par un filtrage numérique passe-bande, convenablement spécifié.

Dans notre cas, la bande des signaux mesurés s'étend de 0 à 150 Hz environ, tandis que les signaux utiles (défaut ou événement attendu + défaut) couvrent la bande de 5 à 100 Hz.

On souhaite imposer la contrainte supplémentaire de ne pas déformer les signaux dans la bande passante du filtre. On sait que ceci conduit à exiger un déphasage linéaire pour le filtre et que c'est possible en numérique (contrairement à l'analogique). La méthode de Rabiner, Mac Clellan et Parks (fondée sur l'algorithme de Remez) permet de synthétiser de tels filtres aux performances satisfaisantes [6], à condition de ne pas descendre trop bas en fréquence pour la partie passe-haut du filtre passe-bande.

La figure 3 illustre un tel traitement.

3.2. DÉTECTION DE NON-STATIONNARITÉS

3.2.1. Présentation du problème

Une fois qu'un filtrage passe-bande a été appliqué à certaines parties de signal, la première tâche de traitement est la **segmentation** : il s'agit de découper le signal fourni par la sonde (ou plus exactement les signaux aux différentes fréquences F1, F2, F3) en « zones cohérentes », d'abord **en repérant les événements attendus** (tube de référence, dudgeonnage, plaque tubulaire, plaques-entretoises, partie cintrée), puis **en isolant les zones stationnaires** (stabilité du signal pseudo-périodique ou stationnarité à l'ordre deux des composantes aléatoires), enfin **en détectant les indications de défaut**.

Ces différentes tâches de segmentation réclament des stratégies distinctes : si le repérage des événements attendus peut s'appuyer sur des considérations géométriques et logiques, les autres phases ressortissent du traitement de signal classique, avec des hypothèses qui peuvent changer selon les cas : modification brusque du contenu spectral du bruit métallurgique, apparition aléatoire d'un transitoire de forme inconnue dans un bruit pseudo-périodique...

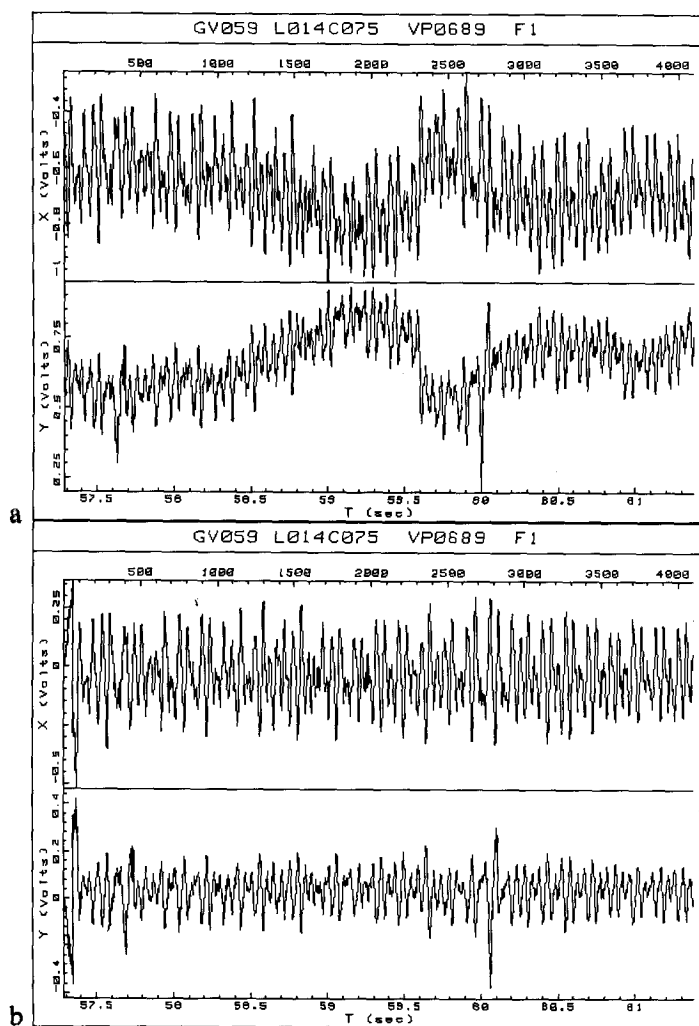


Fig. 3. — Filtrage passe-bande RIF

3.a Signal temporel complexe présentant une composante basse fréquence et du bruit haute fréquence

3.b Signal après filtrage.

Pour aborder ce problème autrement que naïvement (c'est-à-dire au moyen d'un simple seuil sur l'amplitude instantanée du signal), on doit caractériser le signal (ce que l'on cherche) et les bruits (ce qui nous gêne).

3.2.2. Approche par changement de modèle

Les zones de bruit métallurgique sans défaut sont utilisées comme zones d'apprentissage d'un modèle (au sens du traitement de signal, c'est-à-dire que l'on détermine les paramètres autorégressifs ou de Prony qui représentent correctement le bruit). Les paramètres de ce modèle (ou une grandeur qui en est dérivée) servent à construire un test de *changement de modèle*, indiquant à quel endroit le signal examiné a changé suffisamment.

Parmi plusieurs méthodes possibles, nous avons sélectionné celle des franchissements d'un seuil par l'erreur de prédiction linéaire [7].

On compare le module de l'erreur de prédiction linéaire (éventuellement complexe) à un seuil. On décide qu'il y a une non-stationnarité s'il se produit un dépassement pendant L échantillons consécutifs du signal. Dès qu'une telle situation est observée, un nouveau jeu de paramètres est estimé sur une fenêtre suivant de quelques échantillons le transitoire détecté. Les paramètres à régler sont la longueur d'apprentissage (300 points typiquement), l'ordre du modèle (8 typiquement), la longueur L du mot de dépassement (3 ou 4 typiquement), le décalage de réinitialisation (128 typiquement). Pour estimer le modèle AR lui-même, on utilise les algorithmes de Morf ou de Marple.

3.3. FILTRAGE ADAPTATIF

On se pose ici le problème de diminuer le bruit métallurgique. Ceci serait relativement simple si le spectre de ce bruit ne recouvrait pas celui du signal à estimer (selon les cas : plaque, défaut ou défaut sous plaque).

Nos analyses ont montré qu'il y avait recouvrement et que, donc, un filtrage passe-bande classique ne résoudrait pas la question. Il faut recourir aux méthodes de *soustraction de bruit*.

Une autre difficulté tient à la nature du bruit : selon les tubes et même selon les endroits dans un tube donné, le bruit varie. En général, il se compose de quelques raies fines (3 ou 4 sinus d'amplitude notable) ; cette décomposition spectrale est elle-même susceptible d'évoluer, jusqu'à des changements d'allure très nets.

Malgré la nature complexe des signaux, on ne traite souvent que la voie X, car les contrôleurs ont l'habitude de régler leur chaîne de telle sorte que les signaux de face interne apparaissent sur X (c'est le cas des défauts internes et aussi du bruit métallurgique), les signaux externes apparaissant sur la voie Y (c'est le cas des plaques par exemple) ; en pratique, c'est donc la voie X qui demande un « nettoyage » du bruit.

Plusieurs approches ont été étudiées qui, toutes, supposent une superposition additive du signal et du bruit :

* la méthode de Moriwaki et Tlusty, la plus naïve [5], considère que parmi 3 blocs consécutifs de signal, un seul contient le mélange (signal + bruit). Les autres blocs permettent de calculer, par une formule simple dans le domaine fréquentiel, une estimation du bruit dans le bloc bruité et, par soustraction, d'obtenir le signal filtré. Cette méthode est en pratique peu efficace.

* le *corrélo-filtre de Baudois et Silvent* [6] a été essayé, dans une variante itérative qui permettait d'éviter les opérations de détection des pics et de normalisation, pénalisantes pour un fonctionnement en ligne. La méthode utilise une référence de bruit, ressemblant fortement au bruit perturbateur, et calcule, par intercorrélacion, une réponse impulsionnelle qui permet de filtrer la référence de bruit, d'en déduire une estimation du bruit perturbateur et de la soustraire au signal mesuré. Il s'agit là, d'une extension du filtrage de Wiener, dans le cas où le bruit n'est pas aléatoire.

Il importe de discuter les hypothèses sous-jacentes : additivité, non-corrélation signal/bruit, stabilité des raies du bruit, qui ne sont vérifiées qu'approximativement.

La référence bruit seul adoptée est le signal Courants de Foucault à la fréquence de contrôle $F_1 = 500$ kHz. La

figure 4 illustre le résultat d'un tel filtrage sur un signal de plaque quadrifoliée.

La plaque quadrifoliée n'est pas un défaut ! C'est une plaque-entretoise, dont les trous ont une forme très particulière (trèfle à quatre feuilles). Cette géométrie a été

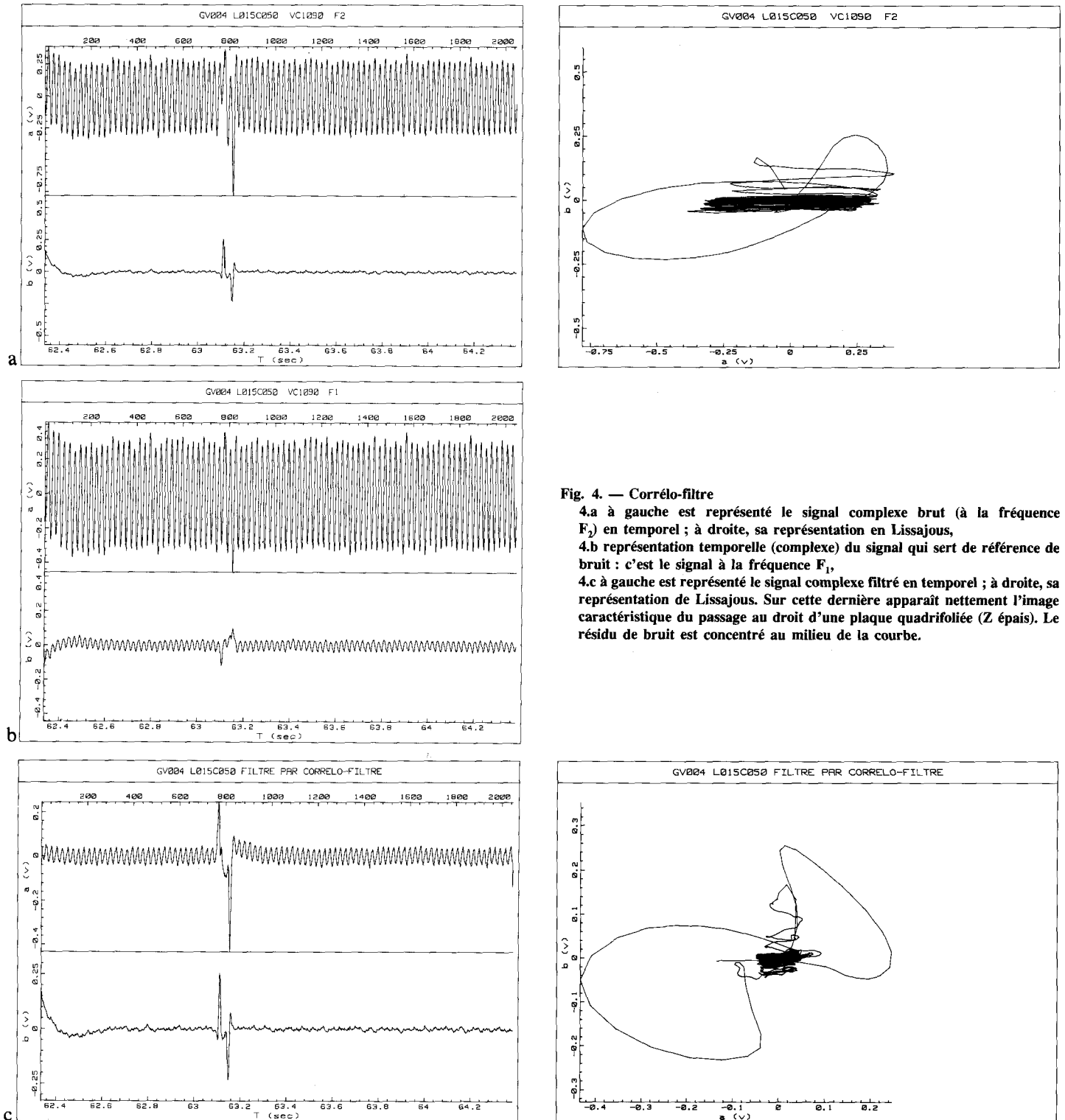


Fig. 4. — Corrélo-filtre

4.a à gauche est représenté le signal complexe brut (à la fréquence F_2) en temporel ; à droite, sa représentation en Lissajous,

4.b représentation temporelle (complexe) du signal qui sert de référence de bruit : c'est le signal à la fréquence F_1 ,

4.c à gauche est représenté le signal complexe filtré en temporel ; à droite, sa représentation de Lissajous. Sur cette dernière apparaît nettement l'image caractéristique du passage au droit d'une plaque quadrifoliée (Z épais). Le résidu de bruit est concentré au milieu de la courbe.

étudiée pour améliorer le passage de l'eau du circuit secondaire et éviter la formation de dépôts. Son « image » par la sonde à courants de Foucault a la forme d'un Z aux branches épaisses.

Si le bruit métallurgique est trop important, son signal déforme le Lissajous, à tel point qu'un contrôleur ne peut plus reconnaître le type de la plaque (fig. 4a, à droite) et encore moins la présence d'un éventuel défaut sur la surface externe du tube, au droit de la plaque (c'est ce que les contrôleurs appellent un « défaut sous plaque »).

En filtrant le signal brut (ou simplement sa composante X) par le signal à la fréquence d'excitation F_1 (qui sert de référence, car il est surtout sensible au bruit interne), on obtient le signal restauré de la figure 4.c. Ce Lissajous est alors parfaitement interprétable par le contrôleur : un défaut externe apparaîtra sans ambiguïté. Ce résultat est tout à fait spectaculaire, mais ne doit pas occulter le fait que nous cherchons un traitement *robuste en ligne*. Et, de ce point de vue, il faut craindre les zones de tubes victimes de « changements d'allure » du bruit. Enfin, l'impossibilité de filtrer en temps réel les deux voies du signal complexe, nous a conduits à chercher une troisième approche.

* la soustraction de bruit par **filtrage adaptatif** [6, 10] est encore un sujet de recherche actuellement, suite aux travaux de Widrow. La méthode consiste à identifier un filtre numérique, à réponse impulsionnelle finie (RIF) ou infinie (RII), tenant compte des évolutions du signal à filtrer. Les coefficients du filtre, contrairement au cas évoqué plus haut (cf. 3.1), ne sont plus constants, mais remis à jour au moyen de l'optimisation d'un critère. L'opération de synthèse n'est donc plus séparée de l'opération de filtrage, mais jumelée.

Parmi les différentes solutions envisageables, nous avons choisi l'algorithme des **moindres carrés récursifs**, qui présente l'avantage d'une convergence rapide et d'une erreur résiduelle faible, au prix d'une certaine complexité. Là encore, la référence de bruit est fournie par le signal à 500 kHz. la longueur du filtre RIF est fixée à une valeur allant de 5 à 11 selon les caractéristiques du bruit métallurgique. Le facteur d'oubli est choisi à 0,99.

Une évaluation rapide permet d'espérer un fonctionnement en temps réel (une itération pour une voie — X ou Y — demanderait 0,3 ms environ sur un processeur de signal standard).

Le filtre étudié s'accommode de bruit non stationnaire, élimine les défauts externes et est sensible aux indications de défauts internes.

L'étape suivante du travail a consisté à essayer d'élaborer une référence de bruit exempte de défaut interne : deux solutions ont été imaginées (détection et filtrage prédictif adaptatif [6], interpolation adaptative [8]).

3.4. CLASSIFICATION

À partir du moment où l'on a isolé et filtré un « morceau » de signal, il reste à le reconnaître, c'est-à-dire à le classer, à supposer que soient définies des classes d'événements et de défauts.

Pour le problème industriel, cette simple hypothèse est déjà peu réaliste pour les raisons suivantes :

- * d'abord les défauts évoluent au cours du temps (c'est-à-dire d'un contrôle à l'autre) : la notion de **rejet** est donc primordiale et un **nouvel apprentissage** peut être nécessaire,
- * la connaissance et les exigences des contrôleurs augmentent,
- * ensuite de nouveaux défauts peuvent apparaître,
- * enfin, il n'est pas du tout évident que la stratégie de reconnaissance qui consiste à se contenter des informations locales (à l'endroit examiné seulement) soit suffisante ou soit la plus efficace. Nous reviendrons sur ce point au chapitre suivant.

Ces réserves étant faites, nous avons étudié plusieurs types de paramétrisation (ou caractérisations) des signaux, étape préliminaire à la classification proprement dite. En particulier les coefficients cepstraux (déduits d'une modélisation paramétrique du type autorégressif) [7] et les coefficients de Granlund (développement en série de Fourier modifiée du Lissajous) [12] ont été utilisés. Ces derniers nous semblent trop globaux pour une reconnaissance fine (locale).

À partir de ces descripteurs, une mesure de distance (celle de Mahalanobis semble un bon candidat) entre un signal inconnu et les centres de gravité des classes retenues, permet d'attribuer un nom de classe à ce signal.

Il manque, pour afficher des résultats crédibles, de tester ces méthodes sur une banque de signaux représentative de la réalité, ce qui n'est pas encore possible à l'heure actuelle.

4. Les systèmes automatiques en développement

4.1. STACOUF

Un premier système « automatique », algorithmique, est en cours de test en centrale par EDF : STACOUF. Il pilote le porte-sonde, numérise, valide et sauvegarde les données sur disque optique numérique, effectue un « dépouillement » des signaux et gère une base de résultats de contrôle. Il offre un environnement d'analyse convivial, proche des habitudes des contrôleurs. Par contre, il est bien loin d'aller jusqu'à « l'analyse automatique » et risque d'être difficile à maintenir, puisqu'il est écrit en langage évolué standard.

4.2. EXTRACSION^(R)

Le système en cours de développement EXTRACSION commence son travail là où s'arrête STACOUF : à l'analyse. C'est une maquette du système automatique des années 1993-95, baptisé AXELLE.

Notre souci est de privilégier la **maintenabilité**, qualité primordiale pour les systèmes industriels. On pense atteindre cet objectif en **modélisant** les connaissances sur les quatre domaines concernés par le contrôle (le générateur de vapeur, la chaîne de mesure, les signaux, la procédure), en n'implantant ces connaissances qu'à un seul endroit du système, en prévoyant des procédures de **vérification de cohérence**. Le développement lui-même sera conduit avec des outils de haut niveau (générateurs de système expert, d'interface homme-machine).

EXTRACSION sera en fait un superviseur (non algorithmique), qui déclenchera à bon escient des traitements (filtrage, détection, classification...), en tenant compte du **contexte**, non seulement le long d'un tube, mais multitubes et multi-dates. Par exemple, il n'est pas inutile de savoir, pour interpréter un morceau de signal, que la sonde se trouve dans les « petits cintres » et que le contrôle

précédent avait déjà signalé un défaut de faible profondeur (fig. 5).

Dans chaque domaine de connaissances, EXTRACSION devra évidemment « posséder » des informations, mais il devra en fait être « expert », y compris en traitement du signal, pour déclencher le bon algorithme, avec les bons paramètres...

4.3. AUTRES SYSTÈMES EN COURS DE DÉVELOPPEMENT (AILLEURS QU'À EDF)

Avec des objectifs relativement proches sont actuellement en cours de développement plusieurs autres logiciels : AIDA et SOCRATE chez INTERCONTROLE et CEA, AITRAS dans le cadre d'un projet européen, auquel participent LABORELEC et FRAMENEC.

ORGANISATION GÉNÉRALE DE LA CONNAISSANCE

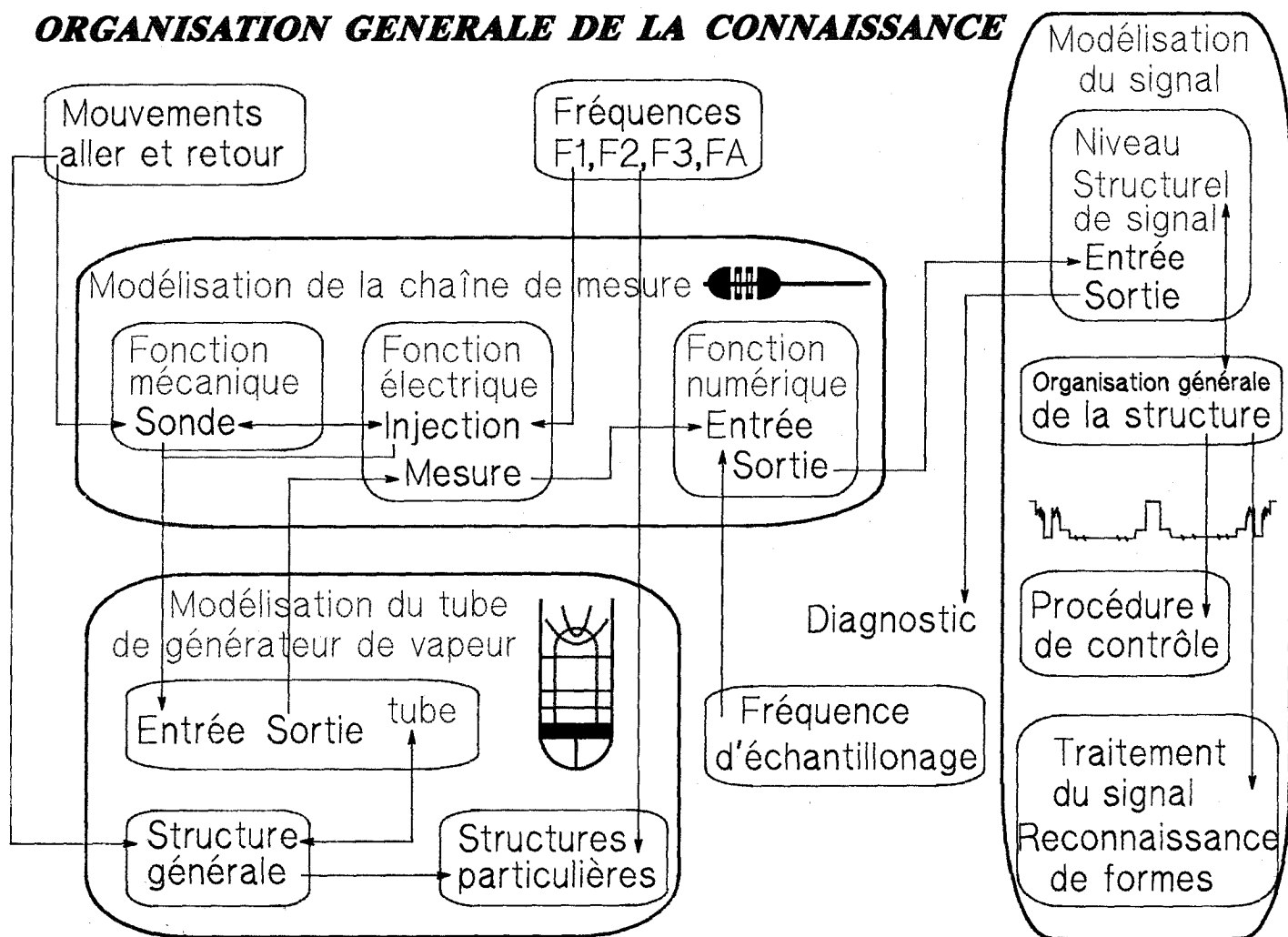


Fig. 5. — Architecture logique d'EXTRACSION : les différents domaines de connaissances.

Conclusion

Nous avons présenté une vaste étude de traitement du signal « Courants de Foucault » (le mot Traitement est à prendre ici dans son acception la plus large), qui a demandé, bien sûr, plusieurs années. Hommes de développement.

Les enseignements à tirer de cette expérience sont nombreux [15].

En premier lieu, il est clair que les méthodes les plus performantes de traitement du signal sont nécessaires, quand on aborde un problème industriel de quelque importance : nous avons parlé de modélisation paramétrique, de filtrage adaptatif, de détection, de classification. La raison en est que les signaux industriels sont « ce qu'ils sont » : bruités, souvent non stationnaires, en grand nombre et longs. On vise de plus un traitement en ligne. Malgré les efforts qu'y consacrent les industriels, cette exigence ne peut être remplie que si le transfert des méthodes sophistiquées, des laboratoires de recherche vers les secteurs d'application, est assuré correctement. D'autres approches, potentiellement fécondes, n'ont pas encore été utilisées : nous pensons particulièrement au traitement multidimensionnel, voire à la fusion de données (sonde SAX, sonde STL, ultrasons...), au moins pour certaines zones de tubes. Même les études (coûteuses) qui ont pu être faites, restent partielles : comment être sûr que l'on a envisagé toutes les méthodes potentiellement efficaces, comment être sûr qu'elles ont été employées au mieux, que les évaluations étaient objectives...

Deuxièmement, les méthodes restent proches de l'application (de la physique, des capteurs, des modes de raisonnement des experts). Une connaissance relativement détaillée de l'origine du bruit métallurgique, par exemple, était nécessaire pour imaginer des méthodes de filtrage. C'est ce qui distingue en fait le traitement du signal d'autres disciplines comme les mathématiques appliquées...

Troisièmement, pour une tâche complexe comme celle que nous avons décrite, le recours à des étages de nature différente est inévitable. Cette constatation emmène loin : le recours à un superviseur demande une connaissance approfondie des méthodes elles-mêmes et de leurs conditions d'application.

Enfin, et cette péroraison n'est pas originale, avoir à sa disposition un ensemble représentatif de signaux expertisés, si possible organisés dans une base de données, est difficile dans les situations industrielles, mais constitue la vraie richesse qu'il faut viser. Elle permet en particulier une politique d'échange avec les laboratoires de recherche.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] PERDRIX, *Contrôles par Courants de Foucault*. Cours du CAST (Lyon).
- [2] American Society for Non Destructive Testing, *Electromagnetic Testing* (vol. 4), 1986.
- [3] DONATI, ST PAUL, ZACHARIE, *La corrosion des tubes de GV REP*, revue ÉPURE Études et Recherches EDF.
- [4] ÉPURE numéro spécial sur le CND (disponible auprès des Études et Recherches EDF) numéro 16, 1986.
- [5] GEORGEL, *Signal to Noise ratio enhancement for eddy current testing of steam generator tubes in PWR's*. Congrès CND de Grenoble, 1985.
- [6] POUPEAU, Amélioration du rapport signal sur bruit des signaux de contrôle par Courants de Foucault, thèse de doctorat Université Paris 6, 1988.
- [7] VILLEMUR, *Modélisation paramétrique et classification automatique de signaux de forme transitoire ; application au contrôle non destructif*, rapport de fin de contrat de recherche EDF P21L01 et thèse de doctorat de l'INPT, 1988.
- [8] QUENDRO, *Automatisation du CND par Courants de Foucault ; amélioration du rapport signal sur bruit*, thèse de doctorat de l'UTC, 1989.
- [9] BENAS, LEFEVRE, *Automatic system for eddy current examination of steam generator tubes*, World conference on non destructive testing, Amsterdam, 1989.
- [10] GdR 134 Traitement du Signal et Images, *Comparaison d'algorithmes adaptatifs en régime non stationnaire*, rapport de synthèse, janvier 90.
- [11] POUPEAU, LEFEVRE, *Évaluation de méthodes de restauration de signaux Courants de Foucault : combinaison de fréquences, corrélo-filtre*, congrès GRETSI, 1987.
- [12] CARRÉ, PONS, GEORGEL, ROSE, Actions coordonnées d'EDF pour l'amélioration des performances des contrôles par CdF, 6^e colloque international sur les méthodes de CND, Strasbourg, 1986.
- [13] Journées Traitement du Signal en Mécanique, 1990.
- [14] Courrier du CNRS, numéro spécial Signaux et Images, 1991.
- [15] B. GEORGEL, D. GARREAU, *Le traitement du Signal à EDF*, Congrès GRETSI, 1991.

Manuscrit reçu le 19 juin 1991