



**DIAGNOSTIC DES SIGNAUX DE CONTROLE
PAR COURANTS DE FOUCAULT
DES TUBES DE GENERATEURS DE VAPEUR**

P. BEAUSEROY⁽¹⁾, F. LEFEVRE⁽²⁾, P. GAILLARD⁽¹⁾

1 - Université de Technologie de Compiègne, 60200 COMPIEGNE, FRANCE
2 - EDF/Direction des Etudes et Recherches/EP/SDM, 78400 CHATOU, FRANCE

Résumé:

Une nouvelle stratégie de **diagnostic automatique** des signaux de contrôle par **courants de Foucault**. Le diagnostic est divisé en deux étapes: la **détection** et l'**analyse**. L'étape de détection est fondée sur une **approche statistique** du processus de décision. Deux méthodes de **caractérisation** des signaux sont proposées. Pour améliorer les performances de détection, ces méthodes intègrent des **informations a priori** sur le signal. La première méthode utilise la structure des éléments contrôlés pour définir la structure du signal. La seconde utilise une modélisation simple du mode de réception du capteur pour estimer le signal ajouté à la réponse théorique de la sonde. Les performances des deux méthodes de caractérisation sont comparées sur un ensemble significatif de signaux réels. Divers modes d'**apprentissage** sont également comparés.

Abstract:

A new scheme for **automatic diagnosis** of **Eddy currents testing** signals of steam generator is proposed. The diagnosis process is divided in two steps: **detection** and **analysis**. Detection is organised as a **statistical decision** process. Two different methods have been developed to **characterise signals**. In order to achieve a higher level of performance, these methods use **a priori knowledge** about signals. The first one modelise the structure of signal related to the structure of the component which has been evaluated. The second method makes use of a crude model for probe response to estimate the additive signal which has modified the observed signal. Great amounts of data are used to compare the detection ability of both methods. Some **classifiers** and **learning techniques** are also discussed.

INTRODUCTION

Nous présentons une stratégie de diagnostic ainsi que les méthodes de traitement du signal et de reconnaissance des formes adaptées aux signaux de contrôle par courants de Foucault des tubes de générateurs de vapeur (GV) de centrales nucléaires. Ces méthodes sont destinées à être intégrées dans un système expert développé par EDF [1] qui assurera la gestion des contrôles et l'aide au diagnostic.

Le contrôle est réalisé à l'aide d'une sonde interne, alimentée par des courants alternatifs de différentes fréquences. La sonde est poussée puis tirée dans les tubes. Elle fournit 4 signaux bi-voies (mesures d'impédance) correspondant à 4 mesures simultanées de la même portion de tube. Les signaux diffèrent par la fréquence d'alimentation qui détermine la profondeur de pénétration des courants induits [2].

Les **signaux recueillis résultent, en première approximation, de la somme des réponses de la sonde à trois types de sources (hypothèse d'additivité des signaux):**

- la surface interne du tube, légèrement déformée par le procédé de fabrication, provoque un signal quasi-stationnaire: le bruit de structure,
- les défauts,
- les composants métallurgiques du GV.

Trois fréquences sont utilisées, chacune choisie afin de privilégier la réponse à un type de sources. Cependant, la fréquence sensible aux défauts (fréquence intermédiaire) l'est aussi aux autres sources. L'interaction entre les sources donne naissance à des signaux composés dont les caractéristiques sont très variables. Leur interprétation est difficile.

Les premières études de classification automatique [3,4,5], fondées sur des modélisations globales des signaux, n'ont pas réussi à représenter correctement ces signaux composés. Or, les défauts se développent en priorité à proximité des éléments métallurgiques; ces solutions doivent donc être améliorées.

Ces expériences nous ont conduits à reformuler le problème afin d'utiliser les informations disponibles sur la nature des éléments métallurgiques pour faciliter l'identification d'éventuels défauts.

le processus de diagnostic a été divisé en deux étapes:

- la **détection** des signaux atypiques,
- l'**analyse** des signaux détectés.

La détection doit être automatique et fiable (pour des raisons de sécurité évidentes). En revanche, l'analyse est avant tout une aide à la décision; l'opérateur doit être en mesure d'intervenir et de vérifier la cohérence de l'interprétation qui lui est proposée.

La détection se déroule en trois parties:

- les prétraitements,
- la caractérisation,
- la classification

Cet article présente successivement les différentes étapes de détection et les résultats obtenus avec un ensemble significatif de signaux réels. Les enseignements du travail accompli et les perspectives pour le système d'analyse sont présentés en conclusion.

LES PRETRAITEMENTS

Il s'agit d'isoler un signal transitoire, qui est la réponse à un élément métallurgique connu, contenu dans une portion de signal et ensuite d'atténuer le bruit de structure qui le déforme.

Localisation des transitoires

La localisation des transitoires est réalisée à l'aide d'une heuristique de segmentation qui fait usage des propriétés physiques des signaux.

A partir du signal recueilli à la fréquence la plus sensible aux éléments extérieurs au tube (fréquence peu sensible au bruit de structure), on isole le transitoire de plus forte amplitude qui correspond à un gabarit défini par des contraintes portant sur la longueur du signal recherché [6]. Ces contraintes sont directement liées au rapport de la fréquence d'échantillonnage sur la vitesse de déplacement de sonde et aux caractéristiques métallurgiques de l'élément dont on cherche à isoler la réponse.

Cette procédure simple donne d'excellents résultats puisque plus de 99% des signaux recherchés sont correctement segmentés.



Elimination du bruit de structure

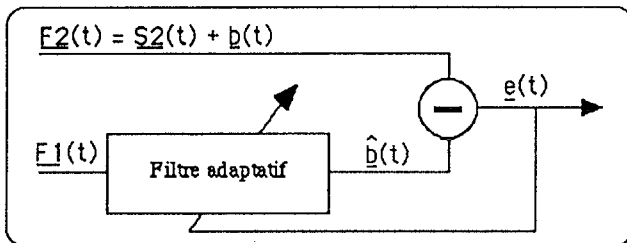
Les supports fréquentiels du bruit de structure et du signal utile sont identiques, les techniques de filtrage classique sont donc inapplicables.

Lors des contrôles, les experts utilisent le signal sensible au bruit de structure (Signal F1) comme référence de bruit et le combinent au signal qu'ils cherchent à interpréter. Le mode de combinaison n'est pas optimal et pose des problèmes pour la détection des défauts internes car la référence de bruit utilisée est sensible à ces défauts. Leur détection nécessite donc la mise en place d'un protocole spécifique.

Le filtrage par interpolation permet de restaurer les signaux affectés d'un bruit à bande étroite instantanée sans utiliser de référence de bruit [8]. Mais, le contenu spectral du bruit de structure ne vérifie pas les conditions d'application de cette méthode [9].

Le filtrage adaptatif se présente comme une solution optimale de substitution pour l'élimination du bruit de structure [7,8].

Diverses versions de tels filtres ont été testées. Le schéma 1 présente le dispositif générique de ces filtres. Les performances sont bonnes mais le problème des défauts internes subsiste (présents sur la voie de référence).



- Figure 1 - Schéma de filtrage du bruit de structure

Nous avons donc retenu une méthode adaptative qui limite les conséquences du filtrage sur la détection des défauts internes car elle permet de conserver la maîtrise de la fonction de transfert du filtre. L'estimation du bruit est obtenue en appliquant un opérateur de gain et de rotation au signal de référence. L'évaluation des paramètres du modèle est réalisée sur une portion de signal précédant le transitoire que l'on souhaite analyser. Une méthode d'optimisation du second ordre assure la convergence rapide des paramètres vers l'optimum.

Le rapport d'énergie du bruit avant et après filtrage est en moyenne de -18dB (estimation sur 20 tubes).

CARACTERISATION

L'objectif est de mettre au point des procédés de description applicable à toutes les familles de signaux de contrôle afin de les caractériser.

METHODE HYBRIDE [10]

Principe

Les signaux possèdent une structure qui résulte de la composition des signatures des éléments métallurgiques contrôlés. Il paraît donc naturel de choisir une description des signaux qui fasse apparaître explicitement la structure des composants du GV. Cette idée s'est concrétisée avec la définition de l'événement.

L'événement est un transitoire élémentaire encadré par des retours à l'équilibre (état stable de la sonde qui correspond à sa réponse dans un milieu parfaitement homogène).

La nature d'un événement dépend de la nature de la source. Connaissant la nature des sources pour chaque type de composants, on peut établir un schéma structurel qui décrit la réponse de la sonde en termes d'événements étiquetés. Notons qu'un événement "vide" a été créé pour tenir compte des retours à l'équilibre de longue durée qui constituent une information structurelle à part entière. On dispose ainsi d'une grammaire qui permet de décrire les signaux par une composition d'événements (succession, superposition).

Les événements sont isolés à l'aide d'une heuristique et étiquetés à partir du schéma structurel pré-établi pour le composant examiné (figure 2).

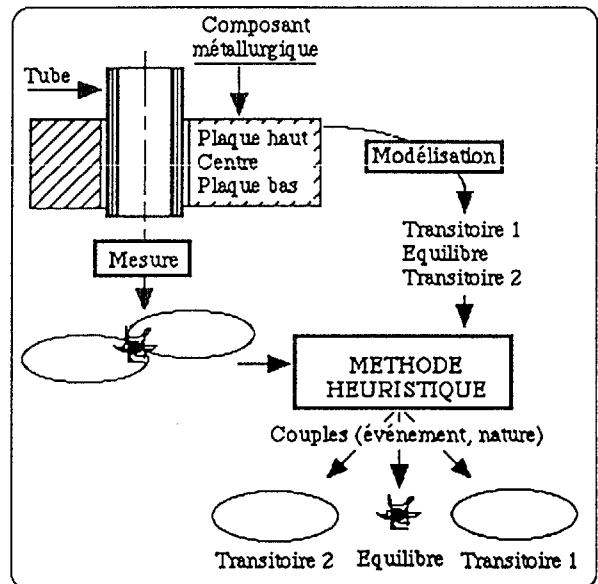
La détection est fondée sur la vérification de la cohérence entre le schéma structurel établi et la réalité physique observée. Deux types d'incohérences peuvent apparaître:

- le schéma établi ne s'applique pas au signal observé,
- la nature des événements isolés ne correspond pas à leur nature théorique.

Le premier type d'incohérence est détecté lors de la segmentation du signal.

La correspondance de la nature des événements isolés avec le modèle établi est vérifiée à l'aide de méthodes de reconnaissance des formes statistiques. Pour chaque type d'événement, on définit un espace de représentation à partir de mesures adaptées. Les qualités discriminantes des espaces de représentation sont évaluées à l'aide de méthodes d'analyses de données [11].

Un signal est détecté si, lors de la classification, un des événements qui le composent est affecté à une classe de défaut.



- Figure 2 - Décomposition structurelle des signaux

METHODE DE COMPARAISON DIRECTE

Principe

On cherche cette fois à modéliser le mécanisme de composition des réponses de la sonde en présence de plusieurs sources.

Sous l'hypothèse d'additivité des signaux on peut poser:

$$O(t) = R_n(t) + S(t) \quad (1)$$

$O(t)$ le signal observé

$R_n(t)$ réponse de la sonde à un composant de type "n"

$S(t)$ la réponse de la sonde à une autre source.

La réponse attendue Rf_n au composant de type "n" est parfaitement connue. Mais, les signaux espérés et observés ne sont pas directement comparables car la réponse et la vitesse de déplacement de la sonde sont susceptibles de varier entre les 2 mesures.

Pour extraire la réponse aux sources à identifier, on cherche une fonction "F" qui compense les distorsions de mesure entre les deux signaux:

$$S(t)_{\text{estimé}} = O(t) - F(Rf_n(t)) \quad (2)$$

Les méthodes de programmation dynamique [12] ou de modélisation adaptative [13] ne donnent pas de résultats satisfaisants car elles ne tiennent pas compte des contraintes physiques du problème.

La méthode adoptée modélise les distorsions entre les deux signaux. La variation de vitesse provoque une désynchronisation des signaux. Les évolutions de réponse de sonde modifient l'amplitude et la phase du signal mesuré.

Comme les transitoires examinés sont courts, la vitesse de sonde est supposée constante pendant la mesure. Par conséquent, la relation temporelle choisie est linéaire.

Soit "F" définit par:

$$F(Rf_n(t)) = G \cdot \exp(j2\pi\Phi) \cdot Rf_n(at+b) \quad (3)$$

Les signaux bi-voies sont représentés sous forme (réel, imaginaire).

"F" est une fonction de "G", "Φ", "a" et "b". L'estimation des paramètres optimaux est obtenue par minimisation du critère:

$$E = \sum_{i=1}^4 \int_{t=0}^{t_f} (O^{(i)}(t) - T^{(i)}(t)) \cdot (O^{(i)}(t) - T^{(i)}(t))^* dt \quad (4)$$

$$T^{(i)}(t) = G^{(i)} \cdot \exp(j2\pi\Phi^{(i)}) \cdot Rf_n^{(i)}(at+b)$$

T* est le complexe conjugué de T

L'indice (i) désigne les mesures aux différentes fréquences de contrôle.

Dans la pratique, la forme optimisée est obtenue à partir de (4) par discrétisation.

La minimisation est réalisée à l'aide d'une méthode de quasi-Newton (BFGS) qui assure une convergence rapide [14]. L'évaluation du gradient, à chaque itération, est obtenue par différences finies.

Propriétés [13]

Il n'est pas réellement possible de faire une étude théorique de la convergence de cette méthode. Cependant, on montre que l'optimum de (4) ne correspond pas nécessairement au signal recherché. De plus (4) n'est ni linéaire ni convexe; il existe des minima locaux qui ne correspondent pas à la solution souhaitée. Cependant, les conditions initiales proches de l'optimum recherché sont simples à définir. On s'assure ainsi de la convergence vers une solution proche de celle que l'on cherche.

De plus, si l'énergie de S(t) ou sa corrélation avec R(t) est faible, on montre que la solution vers laquelle l'algorithme converge est assez proche de la solution souhaitée.

Dans la pratique, les conditions de faible énergie et de faible corrélation sont vérifiées.

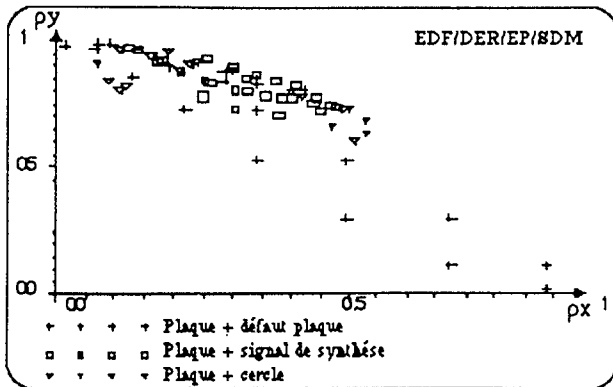
Nous avons cependant complété cette étude par une approche expérimentale des performances de la méthode. Un ensemble de signaux a été synthétisé par ajout d'un "défaut" à un signal connu. On évalue ensuite la qualité de l'estimation en mesurant la corrélation entre le signal estimé et le défaut "D" ajouté (figure 3).

Les corrélations sont définies par:

$$\rho_x = \frac{R_n^t D}{\sqrt{(R_n^t R_n) \cdot (D^t D)}} \quad (5)$$

$$\rho_y = \frac{S_{estimé}^t D}{D^t D}$$

X désigne un signal échantillonné mis sous forme vectorielle

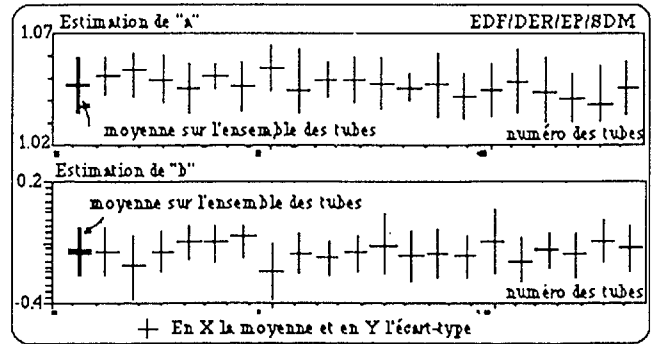


- Figure 3 - Influence de la corrélation sur la qualité d'estimation

On constate que la corrélation entre le signal et le "défaut" détermine en partie la qualité de l'estimation. Il semble que la forme du signal ait aussi une importance non négligeable. L'énergie du défaut, si elle reste inférieure à l'énergie du signal, n'est pas un facteur très important.

De plus, on vérifie sur un ensemble de signaux réels, que les paramètres de synchronisation estimés entre deux mesures à des fréquences différentes d'une même portion de tube sont stables et proches de la solution cherchée (mesures simultanées donc a=1 et b=0). Le biais sur l'estimation de "a" est dû à la différence de dynamique entre les deux signaux comparés qui n'ont pas la même sensibilité aux composants métallurgiques utilisés pour le test (figure 4).

Ces observations prouvent la validité du modèle choisi. Toutefois, le signal estimé n'est pas une évaluation suffisamment fiable du défaut éventuel pour servir de base à l'étape d'analyse.



- Figure 4 - Evaluation des paramètres "a" et "b" à partir de 20 tubes (16 signaux examinés par tube)

Caractérisation du signal estimée

Quelle que soit la nature du signal traité, le signal estimé ne contient plus d'information sur le composant métallurgique. Par conséquent, les signaux résiduels doivent tous avoir les mêmes caractéristiques. Un seul espace de représentation suffit pour effectuer la détection.

Nous avons pris 5 mesures identiques aux 4 fréquences (amplitude, phase, énergies...). Après une analyse statistique (ACP...) de l'espace de représentation, nous avons sélectionné les 9 variables discriminantes parmi les 20 paramètres initiaux.

CLASSIFICATION

METHODES

La classe des individus sains est bien identifiée (signaux sans défaut), on peut la caractériser facilement. En revanche, la classe des défauts est mal connue. Par conséquent, la règle de décision doit apprendre puis reconnaître les individus sains et, a contrario, ne pas reconnaître les individus atypiques. Nous avons donc sélectionné deux méthodes de classification supervisée non paramétrique avec une option de rejet en distance [15]:

- la méthode des K plus proches voisins (Kppv) avec rejet [16],
- une méthode neuronale [17].

La règle de rejet de la méthode des Kppv est fondée sur un test d'hypothèses qui fait intervenir la distance moyenne entre individus et la variance sur cette distance.

La décision de rejet, en sortie de réseau, est prise en fonction d'un seuil à fixer.

APPRENTISSAGE

La définition d'un ensemble d'apprentissage identique pour tous les sites de contrôle est impensable (chaque appareil possède ses propres caractéristiques) et il est irréaliste de demander la constitution d'un ensemble d'apprentissage important lors de chaque contrôle.

Nous avons étudié deux options:

- utiliser un apprentissage restreint (quelques dizaines d'individus),
- utiliser un apprentissage constitué de signaux provenant des contrôles antérieurs du même GV.

RESULTATS EXPERIMENTAUX

BASE DE DONNEES

Les deux méthodes ont été testées sur un ensemble de 1760 signaux recueillis en 1989 (signaux notés VP89) auxquels il faut ajouter 192 signaux du même GV recueillis en 1987 (notés VP87).



Ces signaux proviennent de 2 types d'éléments du GV:

- les plaques entretroises (1600 de 89 et 192 de 87),
- les plaques de répartition de débit (PRD) (160 de 89).

Sur cet ensemble, nous disposons de 54 défauts et de 148 défauts naissants (leur amplitude est inférieure à 200mV).

Les deux types de signaux étant provoqués par des éléments semblables, leur schéma structurel (Transitoire de plaque 1, Equilibre, Transitoire de plaque 2) et leur caractérisation sont identiques.

RESULTATS

Les résultats de classification figurent dans la Table 1, les seuils de rejet sont indiqués sous le label identifiant la méthode de caractérisation.

	Méthode	Fausse alarme	Défauts naissants	Défauts	PRD
Kppv VP87	hybride (0, 300)	4,6	32	100	54
	(0,0)	6	42	100	56
	direct				
	100	5,7	4,6	85	27
	50	7,5	9,2	88	29
Réseau VP87	hybride (0,2,0)	1,4	19	100	22
	(0,8, 0,05)	7	37	100	94
	direct				
	0.2	5,5	4,6	85	31
	0.9	18	16	97	46
Kppv VP89	hybride (0, 300)	10	46	100	66
	(0,0)	16	69	100	69
	direct				
	100	14	12	93	48
	50	18	14	95	73
Réseau VP89	hybride (0,2,0)	3,9	31	100	38
	(0,8, 0,05)	13	58	100	97
	direct				
	0.2	10	11	93	91
	0.9	28	29	97	98

Table 1 - résultats expérimentaux

Les défauts non détectés ne dépassent jamais 250mV d'amplitude, le seuil actuel de détection est de 400mV. Les performances sont donc très satisfaisantes.

Ces résultats nous inspirent des commentaires sur trois points:

• **Méthodes:** La méthode hybride discrimine mieux les défauts que la méthode de comparaison direct. Cependant, cette dernière est plus sensible à certains aspects du signal: on remarque une meilleure détection des PRD et un accroissement du taux de fausse alarme. De plus, avec la méthode hybride, il faut définir autant de seuils de rejet que d'espaces de représentation alors qu'un seul suffit pour l'autre méthode.

• **Historique:** L'utilisation d'anciens signaux pour constituer l'apprentissage donne de très bons résultats avec la méthode hybride alors que la méthode directe est plus sensible au millésime des données d'apprentissage.

• **Classifieurs:** Le réseau généralise un peu mieux, en particulier pour les plaques de répartition de débit. Globalement, les deux classifieurs sont comparables.

CONCLUSION

Nous avons proposé une démarche en deux étapes pour le diagnostic des signaux de contrôle par courants de Foucault. La première étape de détection des signaux atypiques a donné matière au développement de deux approches de caractérisation qui utilisent toutes deux des modélisations différentes des connaissances sur la nature du signal analysé.

Ces deux démarches sont ensuite comparées. Les performances atteintes montrent que la détection automatique des

signaux est possible dans de bonnes conditions de sécurité avec les deux méthodes. Le taux de fausse alarme est dans certains cas élevé, la mise en œuvre d'une procédure de classification adaptative contribuerait sans doute à le faire diminuer.

Le problème de l'analyse n'a pas été abordé. On remarque toutefois que la méthode de comparaison directe recèle un potentiel a priori considérable et qui n'a pas été entièrement exploité. Nous pourrions intégrer des contraintes sur les paramètres ou sur le signal estimé afin de se rapprocher de la solution cherchée. De telles approches sont actuellement en cours d'investigation.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.C. BENAS, F. LEFEVRE "Système automatique de contrôle par courants de Foucault des tubes de générateurs de vapeur", 12ème WCNDT, Amsterdam 1989.
- [2] NON DESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK; Vol 4; "Electromagnetic testing"; ASNT; 2nd edition; 1986.
- [3] A. ROUSSILLO "Reconnaissance des formes statistiques appliquées au contrôle des tubes de générateurs de vapeur par courants de Foucault"; Rapport EDF; HP21/86-12.
- [4] B. GEORGEL, F. PONS, A. LAHAYE "Analyse et classification de défauts par traitement numérique de signaux de CdF"; Congrès CND; Bordeaux 1988.
- [5] S. ROUBEROL "Contrôle par courants de Foucault des tubes de GV; construction d'un espace de représentation pour la discrimination des signaux de plaques"; Rapport EDF; HP21/87-14.
- [6] F. KAUFFMANN "A study of nonstationary phenomena of HRV during 24 hours ECG ambulatory monitoring"; IEEE Conf. Computers in cardiology; Washington D.C.; 25-28 Sept.; 1988.
- [7] Y. POUPEAU "Amélioration du rapport S/B des signaux de contrôle par courants de Foucault"; Thèse de l'université P. et M. Curie; 1988.
- [8] F. QUENDRO, "Automatisation du contrôle non destructif par courants de Foucault. Amélioration du rapport signal sur bruit"; Thèse de l'Université de Technologie de Compiègne"; 1989.
- [9] R. LENGELE "Etude du bruit de fond relevé en CND courants de Foucault des tubes de GV en vue du choix de méthodes de restauration"; Note EDF; HP21/90-35.
- [10] P. BEAUSEROY, F. LEFEVRE, P. GAILLARD "Analyse automatique des signaux de contrôle courants de Foucault des tubes de générateurs de vapeur. Discrimination des signaux de plaque en saine et non saine"; 1er COFREND; Nice 1990.
- [11] E. DIDAY, J. LEMAIRE, J. POUJET, F. TESTU "Eléments d'analyse de données"; Ed. DUNOD, PARIS 1982.
- [12] T. KOHONEN "Median strings"; Helsinki University of technology; Report TKK-F-A572; 1985.
- [13] P. BEAUSEROY "Détection de défauts et décomposition des signaux de contrôle par courants de Foucault des tubes de générateurs de vapeur"; Rapport EDF; HP21/90-38.
- [14] M. MINOUX "Programmation mathématique"; Ed DUNOD; PARIS 1983.
- [15] B. DUBUISSON "Diagnostic et reconnaissance des formes"; Ed. HERMES; PARIS 1990.
- [16] I. CRIGNON "Procédure statistique arborescente de reconnaissance de formes pour l'aide au diagnostic. Application au suivi de bruit neutronique d'un réacteur à neutrons rapides"; Thèse de l'Université de Technologie de Compiègne; 1981.
- [17] M. MASSON, B. DUBUISSON, G. SWINGELSTEIN "Decision system with a rejet option using neural networks"; IMACS-MCTS; Lille 1991.