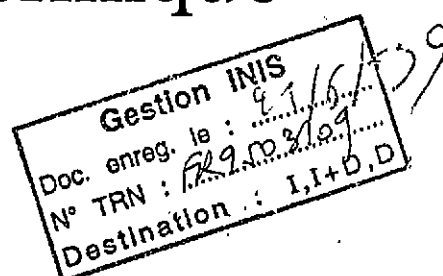

Production d'énergie (hydraulique, thermique et nucléaire)



INTERET DE L'APPROCHE NON-STATIONNAIRE : ESSAI
SUR SIGNAUX COURANTS DE FOUCAULT

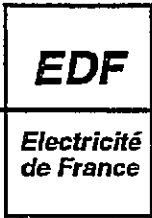
*ADVANTAGES OF THE NON-STATIONARY APPROACH :
TEST ON EDDY CURRENT SIGNALS*

94NB00127



Direction des Etudes et Recherches

IPN
I+D



Direction des Etudes et Recherches

SERVICE ENSEMBLES DE PRODUCTION
Département Surveillance Diagnostic Maintenance

Décembre 1993

BRUNEL P.

**INTERET DE L'APPROCHE
NON-STATIONNAIRE : ESSAI SUR SIGNAUX
COURANTS DE FOUCAULT**

***ADVANTAGES OF THE NON-STATIONARY
APPROACH : TEST ON EDDY CURRENT
SIGNALS***

Pages : 00044

94NB00127

Diffusion : J.-M. Lecœuvre
EDF-DER
Service IPN. Département SID
1, avenue du Général-de-Gaule
92141 Clamart Cedex

© Copyright EDF 1994
ISSN 1161-0611

SYNTHÈSE :

Les méthodes classiques de traitement des signaux s'avèrent souvent inadaptées à l'exploitation des signaux intrinsèquement non-stationnaires comme les signaux de surveillance ou de contrôle. Il faut avoir recours à des méthodes dites "évoluées".

Cette note présente deux applications des méthodes non-stationnaires aux signaux complexes courants de Foucault de contrôle des tubes de générateurs de vapeur.

La première application consiste en la segmentation de la voie absolue de contrôle. Cette voie peut être assimilée à un signal constant par morceaux. L'algorithme de segmentation retenu est celui du test de somme cumulée de Page-Hinkley, qui permet de détecter des sauts de moyenne d'amplitudes inconnues dans un signal constant par morceaux, perturbé par un bruit blanc. Les résultats obtenus sont comparables à ceux fournis par la méthode empirique utilisée actuellement. De mise en œuvre aussi aisée que cette dernière, l'algorithme de Page-Hinkley possède par contre l'avantage d'être bien formalisé et d'identifier le sens de variation du signal lors d'un saut de moyenne.

La seconde application concerne l'aide à la détection de transitoires caractéristiques de défauts dans les voies différentielles de contrôle, grâce à la décomposition par ondelettes continues. Les spectres du bruit et du signal utile sont assez proches, mais non rigoureusement identiques. La décomposition par ondelettes permet d'exploiter ces différences fréquentielles. La décomposition est faite sur les octaves 3, 4, 5 et 6 (correspondant aux fréquences $f_c/8$, $f_c/16$, $f_c/32$ et $f_c/64$; f_c étant la fréquence d'échantillonnage des signaux), à 2 voies par octave. On compare le même critère de détection sur le signal initial d'une part et sur les 8 voies de la décomposition d'autre part (on admet dans ce cas, qu'il faut au moins 3 événements en coïncidence, dont au moins 2 sur les octaves 3 et 4).

La méthode est évaluée sur des signaux synthétiques constitués par sommation de bruits et de signaux de défauts réels.

L'utilisation de la décomposition permet de diminuer de 5 dB le rapport signal sur bruit minimum de détection d'un transitoire par rapport à une détection directe sur le signal originel.

Finalement, un bilan de l'utilisation des méthodes non-stationnaires sur nos données est effectué. Les deux études présentées viennent confirmer le fait que les méthodes non-stationnaires constituent des outils intéressants d'analyse des signaux et des images et complètent bien les méthodes classiques.

EXECUTIVE SUMMARY :

Conventional signal processing is often unsuitable for the interpretation of intrinsically non-stationary signals, such as surveillance or non destructive testing signals. In these cases, "advanced" methods are required.

This report presents two applications of non-stationary signal processing methods to the complex signals obtained in eddy current non destructive testing of steam generator tubes.

The first application consists in segmenting the absolute channel, which can be likened to a piecewise constant signal. The Page-Hinkley cumulative sum algorithm is used, enabling detection of unknown mean amplitude jumps in a piecewise constant signal disturbed by a white noise.

Results are comparable to those obtained with the empirical method currently in use. As easy to implement as the latter, the Page-Hinkley algorithm has the added advantage of being well formalized and of identifying whether the jumps in mean are positive or negative.

The second application concerns assistance in detecting characteristic fault transients in the differential channels, using the continuous wavelet transform. The useful signal and noise spectra are fairly close, but not strictly identical. With the continuous wavelet transform, these frequency differences can be turned to account.

The wavelet analysis is based on the 3rd, 4th, 5th and 6th octaves (corresponding to frequencies $f_c/8$, $f_c/16$, $f_c/32$ and $f_c/64$, where f_c is the signal sampling frequency) with two channels per octave. The same detection criterion is compared with the initial signal and the eight wavelet channels analysis (being considered that at least three coinciding events are then required, at least two of which must be in octaves 3 and 4.

The method was tested on synthetic signals obtained by summing noise and real defect signals.

Using the continuous wavelet transform reduces the minimum signal-to-noise ratio by 5 dB for detection of a transient as compared with direct detection on the original signal.

Finally, a summary of non-stationary methods using our data is presented. The two investigations described confirm that non-stationary methods may be considered as interesting signal and image analysis tools, as an efficient complement to conventional methods.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	5
1. SEGMENTATION PAR DÉTECTION DE CHANGEMENTS ADDITIFS.....	6
1.1. Contexte	6
1.2. Méthode	7
1.2.1. Présentation.....	7
1.2.2. Algorithme.....	8
1.3. Mise en œuvre.....	8
1.3.1. Estimation de la moyenne m_0	8
1.3.2. Inhibition du détecteur après détection	9
1.3.3. Choix du signal utilisé	9
1.4. Résultats	11
1.4.1. Paramètres.....	11
1.4.2. Influence des paramètres v_m et λ	11
1.4.3. Essais sur signaux réels	12
1.5. Synthèse	18
2. DÉTECTION DE TRANSITOIRES DANS DES SIGNAUX BRUITÉS	19
2.1. Contexte	19
2.1.1. Enregistrement complet d'un contrôle	20
2.1.2. Cas particulier de la zone de cintre.....	21
2.2. Méthode	21
2.2.1. Présentation.....	21
2.2.2. Algorithme.....	23
2.3. Mise en œuvre.....	23
2.3.1. Limitation du nombre de voies de la décomposition.....	23
2.3.2. Détection des transitoires.....	24
2.3.3. Décision.....	24
2.3.4. Choix du signal utilisé	24
2.4. Résultats	25
2.4.1. Essai sur signaux de synthèse	25
2.4.2. Essai sur signaux réels.....	36
2.5. Synthèse	39
CONCLUSION.....	40
RÉFÉRENCES	42

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Chaîne de mesure.....	6
Figure 2 : Schéma d'une composante de signal à la fréquence absolue de contrôle.....	7
Figure 3 : Signal FA référencé GV82 VP0390 L4C41.....	10
Figure 4 : Résultat de segmentation sur le signal référencé GV193 VI0190 L36C41	13
Figure 5 : Résultat de segmentation sur le signal référencé GV1 VC1089 L15C79	14
Figure 6 : Résultat de segmentation sur le signal référencé GV193 VI0190 L36C41	15
Figure 7 : Résultat de segmentation sur le signal référencé GV1 VC1089 L15C79	16
Figure 8 : Signal FA référencé GV44 VP0790 L31C48.....	17
Figure 9 : Sensibilité spatiale de la sonde	19
Figure 10 : Schéma de surface interne d'un tube laminé.....	20
Figure 11 : Gabarits des filtres pour $n=6$ et $m=2$	22
Figure 12 : Schéma des défauts utilisés	25
Figure 13 : Signal F1 de gorge interne 75%	26
Figure 14 : Signal F1 de gorge interne 12,6%	27
Figure 15 : Signal F1 de bruit extrait du GV1	28
Figure 16 : Signal F1 de bruit extrait du GV80	29
Figure 17 : Signal F1 de bruit extrait du GV167.....	30
Figure 18 : Détection de transitoires sur le signal de synthèse GI 12,6% + BF GV1 :.....	32
Figure 19 : Détection de transitoires sur le signal de synthèse GI 12,6% + BF GV1	33
Figure 20 : Détection de transitoires sur le signal de synthèse GI 12,6% + BF GV1	34
Figure 21 : Détection de transitoires sur le signal de synthèse GI 12,6% + BF GV1	35
Figure 22 : Schéma des maquettes	36
Figure 23 : Détection de transitoires sur le signal de contrôle de la maquette UV1ABF	37
Figure 24 : Détection de transitoires sur le signal de contrôle de la maquette UV1ABF	38

INTRODUCTION

En 1992, nous nous sommes attachés à réaliser une synthèse sur les travaux menés dans le domaine du traitement des signaux et des images non-stationnaires par les universitaires et au sein du groupe. Ce travail s'est traduit par la rédaction de la note d'étude référencée HP-21/92-34 [BRU92].

Pour mémoire, cette note se décomposait en deux parties distinctes. La première partie est consacrée à la présentation des principales méthodes non-stationnaires existantes et à la mise en évidence des caractéristiques des signaux sur lesquels elles s'appliquent efficacement. La seconde partie fait le tour des applications déjà testées sur nos signaux ou nos images et propose de nouvelles applications potentielles sur nos données, pour les méthodes " évoluées " étudiées dans la première partie.

Ce rapport HP-21/93/050 présente deux applications aux signaux courants de Foucault de méthodes non-stationnaires. Celles-ci sont, bien évidemment, inspirées des pistes de travail proposées dans [BRU92].

La première application consiste en la segmentation de la voie absolue de contrôle par courants de Foucault des tubes de générateurs de vapeur, par un algorithme de détection de changements additifs.

La seconde application concerne l'aide à la détection de transitoires dans les voies différentielles de contrôle par courants de Foucault de ces mêmes tubes, grâce à la décomposition par ondelettes continues.

Pour chaque application, nous nous efforcerons de présenter son contexte et de faire un bref rappel sur la méthode de traitement retenue et déjà présentée dans [BRU92]. Nous détaillerons ensuite la mise en œuvre de l'algorithme choisi et les résultats obtenus sur signaux de synthèse ou signaux réels.

Finalement, nous dressons un bilan de l'utilisation des méthodes non-stationnaires sur nos données.

1. SEGMENTATION PAR DÉTECTION DE CHANGEMENTS ADDITIFS

1.1. Contexte

Le contrôle d'un tube de générateur de vapeur est réalisé, en partie, en déplaçant une sonde axiale à courants de Foucault dans celui-ci. La sonde est fixée au bout d'un flexible. Son avancement dans le tube est contrôlé par un robot tireur-pousseur (figure 1).

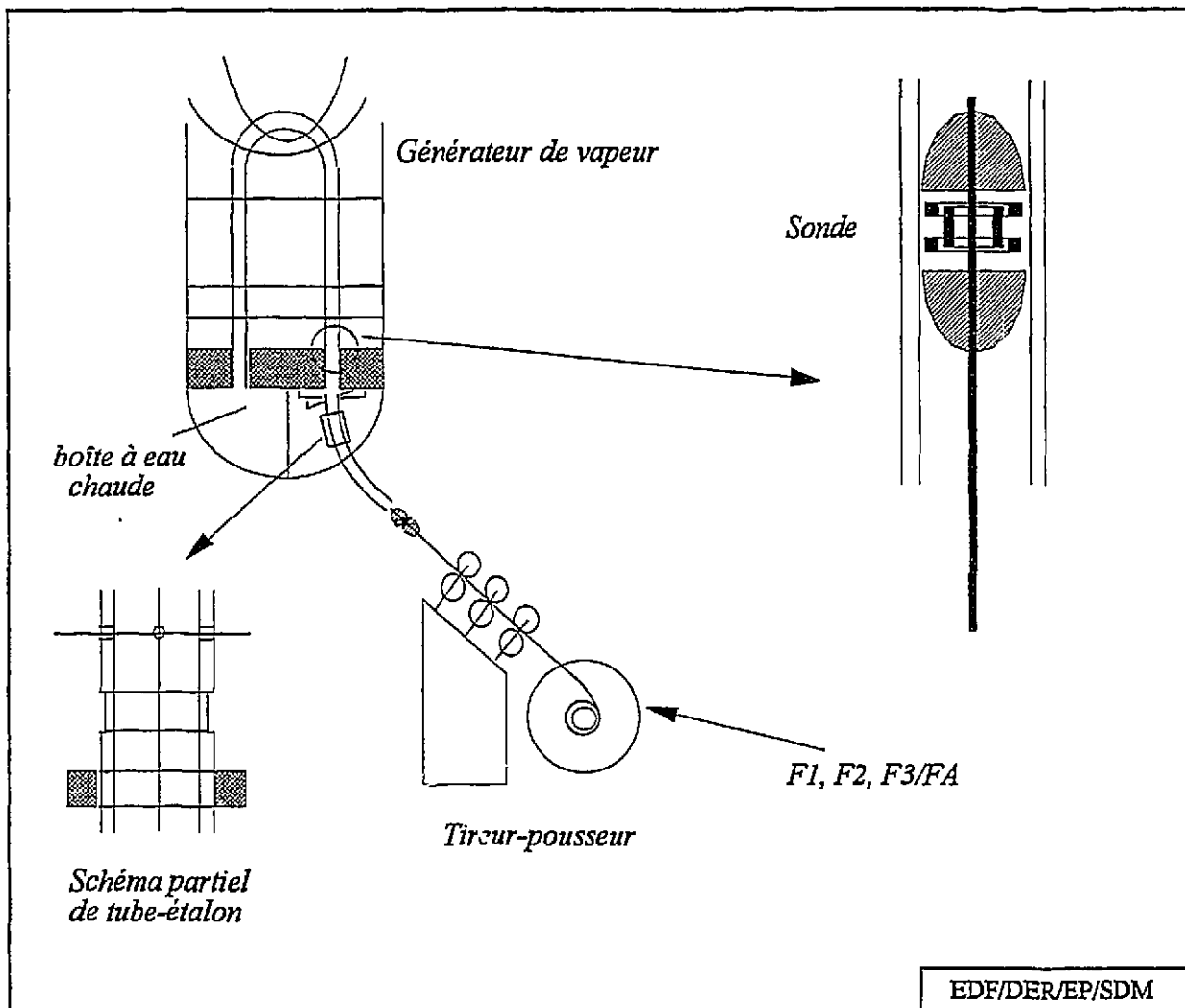


Figure 1 : Chaîne de mesure.

La sonde parcourt deux fois la longueur du tube, une fois à l'aller et une fois au retour. Un enregistrement complet d'un signal de contrôle est donc constitué des enregistrements caractéristiques des différents éléments rencontrés par la sonde sur son parcours :

- la gaine flexible entre le robot tireur-pousseur et le tube-étalon sur le trajet aller,
- le tube-étalon sur le trajet aller,
- la gaine flexible entre le tube-étalon et le tube sur le trajet aller,
- le tube sur le trajet aller,

- le passage dans l'air (boîte à eau chaude),
- le tube sur le trajet retour,
- la gaine flexible entre le tube et le tube-étalon sur le trajet retour,
- le tube-étalon sur le trajet retour,
- la gaine flexible entre le tube-étalon et le robot tireur-pousseur sur le trajet retour.

L'analyse de la fréquence absolue de contrôle (100 kHz pour le palier 900 MW et 120 kHz pour le palier 1300 MW) montre que l'on y distingue particulièrement bien les différentes zones constitutives de l'enregistrement. A cette fréquence, le niveau moyen du signal enregistré varie en fonction des différentes zones rencontrées. Chacune est caractérisée par un niveau spécifique du signal. Les transitions entre ces différentes zones se traduisent par des sauts de moyenne (figure 2).

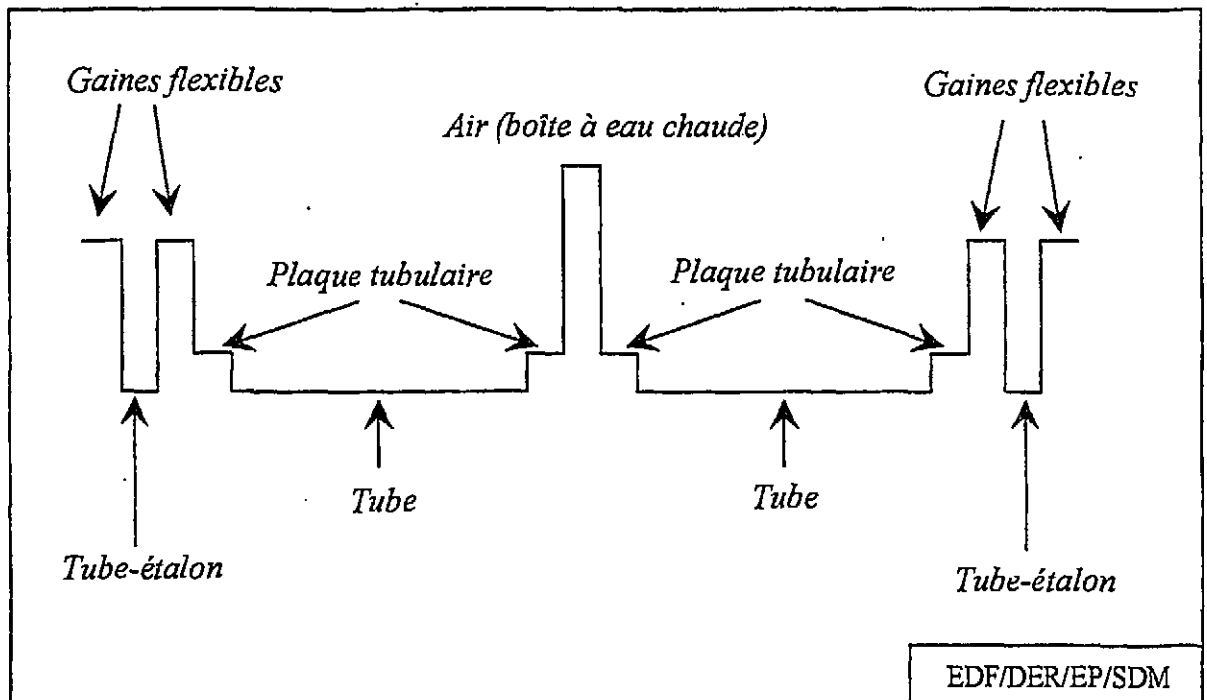


Figure 2 : Schéma d'une composante de signal à la fréquence absolue de contrôle.

Pour pouvoir exploiter un enregistrement d'un signal de contrôle, il est indispensable de repérer ces transitions. Elles permettent :

- de se positionner sur le signal,
- de trouver le tube-étalon, sans lequel la calibration des signaux et leur interprétation sont impossibles.

1.2. Méthode

1.2.1. Présentation

La méthode retenue est celle du test de somme cumulée CUSUM dit de Page-Hinkley, présentée dans [BRU92] au paragraphe 1.2.3.2.

Elle permet de détecter des changements de moyenne, d'amplitudes inconnues dans un signal $\{s(n)\}$ constant par morceaux, perturbé par un bruit blanc.

La solution proposée consiste à activer deux détecteurs en parallèle, pour détecter des augmentations et des diminutions de moyenne, dans lesquels on introduit une notion d'amplitude minimum de saut. La méthode nécessite l'estimation de la valeur moyenne du signal avant le saut.

1.2.2. Algorithme

Étape 1 : estimation de la moyenne m_0 avant rupture.

Étape 2 : élaboration des tests statistiques :

$$\begin{cases} T_0^s = 0 \\ T_n^s = \sum_{k=1}^n \left(s(k) - m_0 + \frac{v_m}{2} \right) \\ M_n^s = \max_{0 \leq k \leq n} T_k^s \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_0^s = 0 \\ U_n^s = \sum_{k=1}^n \left(s(k) - m_0 - \frac{v_m}{2} \right) \\ m_n^s = \min_{0 \leq k \leq n} U_k^s \end{cases}$$

Étape 3 : décision :

- il y a **diminution** si : $Dim_n^s = M_n^s - T_n^s \geq \lambda$,

- il y a **augmentation** si : $Aug_n^s = U_n^s - m_n^s \geq \lambda$.

L'instant de saut estimé est le dernier instant avant le franchissement du seuil λ .

1.3. Mise en œuvre

1.3.1. Estimation de la moyenne m_0

La moyenne m_0 utilisée pour le calcul des tests statistiques est la moyenne glissante du signal, calculée sur un horizon de lg échantillons avant l'instant courant.

La moyenne glissante est donnée par la formule :

$$m_0(n) = \frac{1}{lg} \sum_{k=1}^{lg} s(n-k)$$

Les expressions de T_n^s et U_n^s deviennent alors :

$$T_n^s = \sum_{k=1}^n \left(s(k) - m_0(k) + \frac{V_m}{2} \right)$$

$$U_n^s = \sum_{k=1}^n \left(s(k) - m_0(k) - \frac{V_m}{2} \right)$$

1.3.2. Inhibition du détecteur après détection

La détection de la même transition sur des échantillons consécutifs se produit fréquemment :

- pour une transition courte de forte amplitude,
- pour une transition longue (étalée sur un nombre élevé d'échantillons).

Pour éviter de détecter sur plusieurs échantillons consécutifs la même transition, il est préférable d'inhiber le détecteur sur *inib* échantillons après une détection.

La valeur d'*inib* doit être au moins supérieure ou égale à *lg* de manière à réestimer complètement la moyenne glissante sur la portion de signal suivant la transition détectée.

1.3.3. Choix du signal utilisé

Le signal obtenu par sonde axiale à courants de Foucault, est un signal complexe brut. Il s'exprime comme suit :

$$z(t) = x(t) + jy(t) \quad (\text{formulation continue})$$

$$z(n) = x(n) + jy(n) \quad (\text{formulation discrète})$$

En pratique, les transitions sont nettement plus visibles sur l'une des deux composantes. Dans la mesure où le signal traité est brut (non étalonné), il peut s'agir, invariablement, de la partie réelle $\{x(n)\}$ ou de la partie imaginaire $\{y(n)\}$. La figure 3 présente le cas où les transitions sont plus marquées sur la partie imaginaire du signal.

Dès lors, trois solutions sont envisageables :

- 1- traiter indépendamment les voies x et y. La liste des transitions détectées sur le signal complexe est alors extraite des listes des transitions détectées sur chaque composante. Ce peut être par exemple la liste "réunion".
- 2- traiter directement le module du signal complexe.
- 3- traiter conjointement les voies x et y. Dans ce cas, à chaque échantillon, quatre grandeurs sont calculées : Dim_n^x , Aug_n^x , Dim_n^y et Aug_n^y . Une transition est détectée dès que l'une des quatre grandeurs précédentes est supérieure à λ .

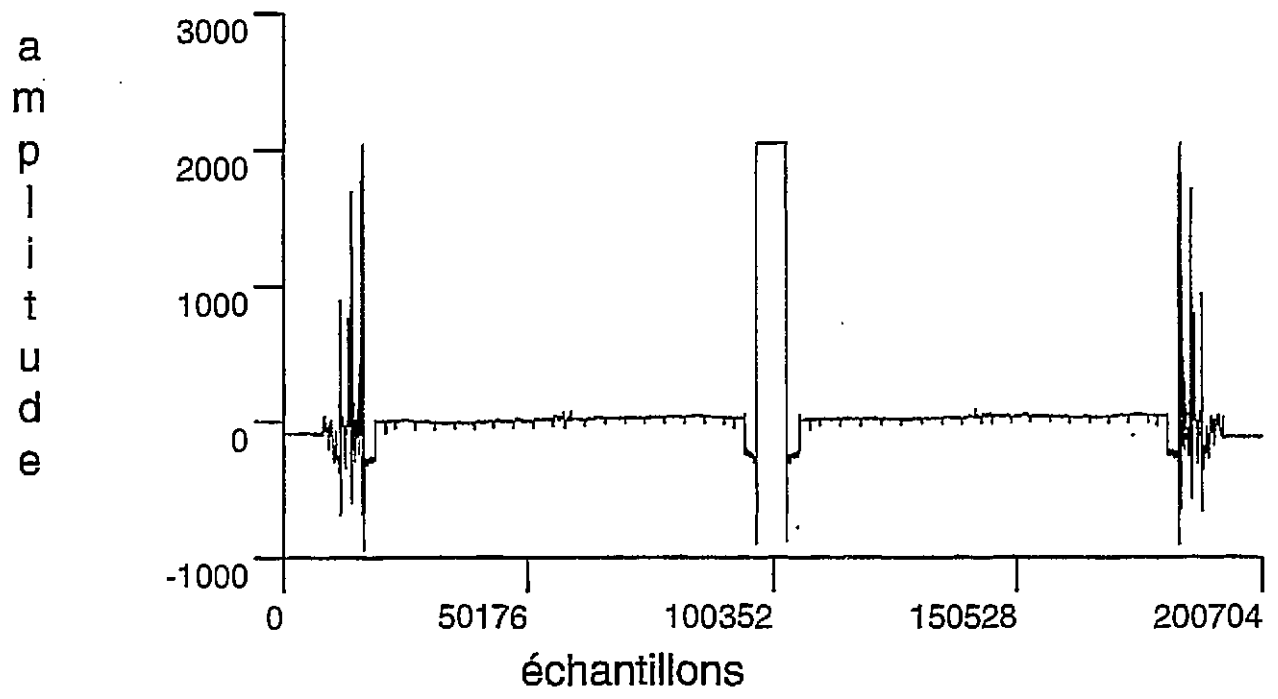
La troisième solution est plus simple à mettre en œuvre que la première solution. En effet, elle ne nécessite pas l'opération de construction de la liste finale à partir de deux listes intermédiaires, opération qui pour être performante doit être assez sophistiquée.

D'autre part, dans la mesure où l'une des composantes est plus bruitée que l'autre, il n'est pas intéressant de travailler directement sur le module. Son exploitation est moins facile que celle de la voie la moins bruitée, étant donné qu'il prend en compte les deux composantes.

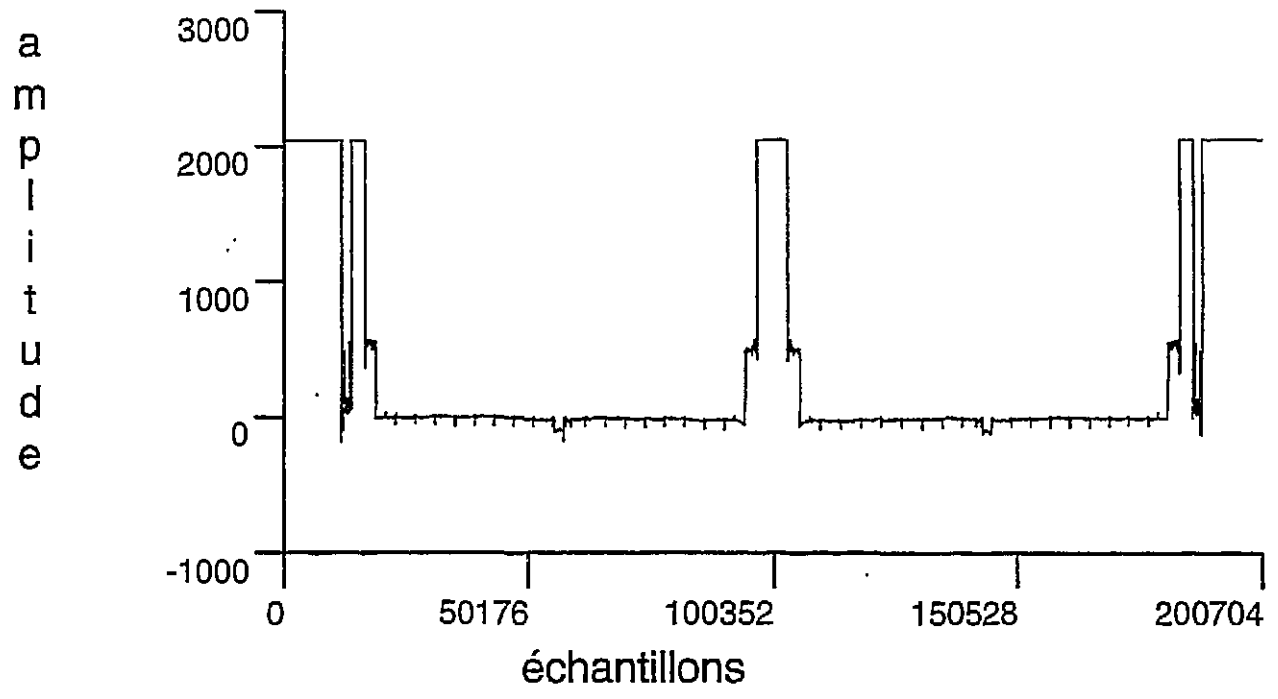
Nous retenons donc finalement la troisième solution.

Figure 3 : G V 0 8 2 V P 0 3 9 0 L 0 0 4 C 0 4 1

Voie X



Voie Y



1.4. Résultats

1.4.1. Paramètres

L'algorithme mis en œuvre possède quatre paramètres de réglage :

- lg : horizon du filtre de calcul de la moyenne glissante,
- $v_m/2$: amplitude minimum d'un saut,
- λ : seuil de détection,
- $inib$: horizon de l'inhibition après une détection.

1.4.2. Influence des paramètres v_m et λ

L'algorithme détecte un saut de moyenne chaque fois que $Dim_n^s \geq \lambda$ ou $Aug_n^s \geq \lambda$. Cela se produit lorsque T_n^s diminue ou lorsque U_n^s augmente, c'est-à-dire :

- lorsque $s(k) - m_0(k) + \frac{v_m}{2}$ devient négatif sur un certain nombre d'échantillons :

$$\sum_{\substack{k_0 \text{ échantillons} \\ \text{successifs}}} \left(s(k) - m_0(k) + \frac{v_m}{2} \right) \leq -\lambda$$

- ou lorsque $s(k) - m_0(k) - \frac{v_m}{2}$ devient positif sur un certain nombre d'échantillons :

$$\sum_{\substack{k_0 \text{ échantillons} \\ \text{successifs}}} \left(s(k) - m_0(k) - \frac{v_m}{2} \right) \geq \lambda$$

L'algorithme détecte un saut de moyenne chaque fois $|s(k) - m_0(k)|$ est supérieur à $\frac{v_m}{2}$ sur un nombre suffisant d'échantillons successifs.

Le seuil de détection λ permet de contrôler :

- le nombre d'échantillons qui doivent vérifier $|s(k) - m_0(k)| - \frac{v_m}{2} \geq 0$,
- l'amplitude réelle que doit avoir une transition, par rapport à l'amplitude minimale,

pour détecter effectivement un saut de moyenne.

Supposons que le couple (v_m^0, λ^0) corresponde à la situation originelle.

Pour v_m^0 fixé, diminuer λ ($\lambda < \lambda^0$) revient à augmenter le nombre de sauts de moyenne détectés.

L'algorithme détecte alors les sauts de moyenne :

- de plus courte durée et de même amplitude,
- de même durée (voire de durée plus longue) et d'amplitude plus faible.

Inversement augmenter λ ($\lambda > \lambda^0$) revient à diminuer le nombre de sauts de moyenne détectés. L'algorithme détecte alors les sauts de moyenne :

- de même durée et d'amplitude plus grande,
- de plus longue durée et de même amplitude.

Pour λ^0 fixé, diminuer v_m revient à augmenter le nombre d'échantillons vérifiant $|s(k) - m_0(k)| - \frac{v_m}{2} \geq 0$ et donc le nombre de sauts de moyenne détectés. Inversement augmenter v_m permet de diminuer le nombre de sauts de moyenne détectés.

En conclusion :

- v_m permet de fixer l'**amplitude minimale** d'un saut ; en deçà, le saut ne peut pas être pris en compte,
- λ permet de contrôler la **forme** du saut.

1.4.3. Essais sur signaux réels

L'algorithme a été appliqué à une dizaine de signaux courants de Foucault réels. Après mise au point, les valeurs finalement retenues pour les paramètres sont :

- $lg = 100$ (échantillons),
- $v_m = 500$ (mV),
- $\lambda = 200$ (mV),
- $inib = 300$ (échantillons).

Ce jeu de paramètres permet de détecter les transitions de forte amplitude entre les différentes zones constitutives d'un enregistrement de sonde axiale (SAX) :

- les transitions gaine flexible/tube-étalon,
- les transitions gaine flexible/plaque tubulaire,
- les transitions tube/air.

Les figures 4 et 5 présentent les résultats de l'application de l'algorithme de segmentation sur deux signaux courants de Foucault distincts. Les traits verticaux gris clair marquent les positions des transitions détectées.

Pour détecter les transitions plaque tubulaire/tube - transitions de faibles amplitudes - il est nécessaire de diminuer la valeur de v_m .

Les figures 6 et 7 présentent les résultats de l'application de l'algorithme de segmentation avec le quadruplet ($lg=100$, $v_m=100$, $\lambda=200$, $inib=300$), pour les deux signaux déjà utilisés sur les figures 4 et 5. Les transitions plaque tubulaire/tube sont effectivement détectées. En contrepartie, la probabilité de fausse alarme augmente. Pour quatre transitions détectées cherchées, l'algorithme met en évidence de nombreuses transitions non recherchées.

D'autre part, la plage de variation des amplitudes des transitions plaque tubulaire/tube est très importante. À l'extrême limite, l'amplitude d'une transition plaque tubulaire/tube peut être nulle. La figure 8 présente un signal sur lequel les transitions plaque tubulaire/tube ne sont visibles que sur la partie imaginaire. Les transitions peuvent n'être visibles sur aucune des composantes d'un signal.

Figure 4 : G V 193 V I 0190 L 036 C 041

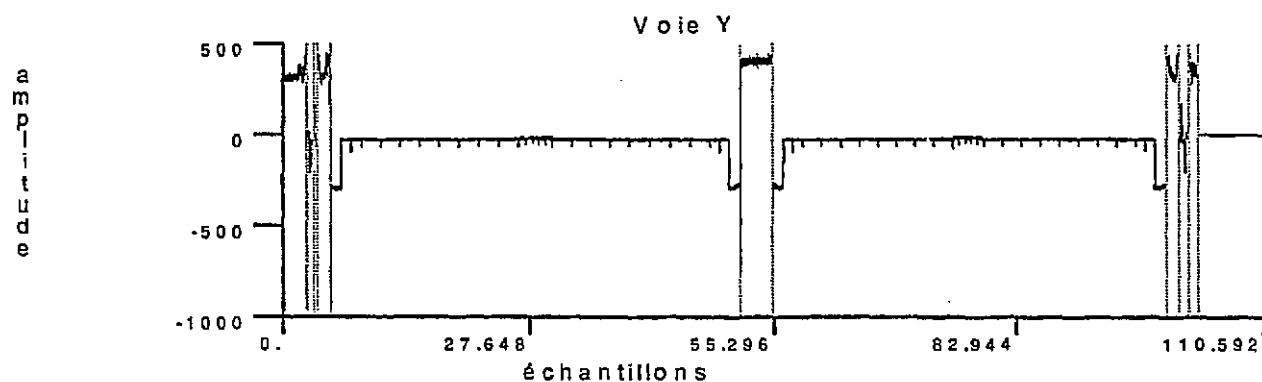
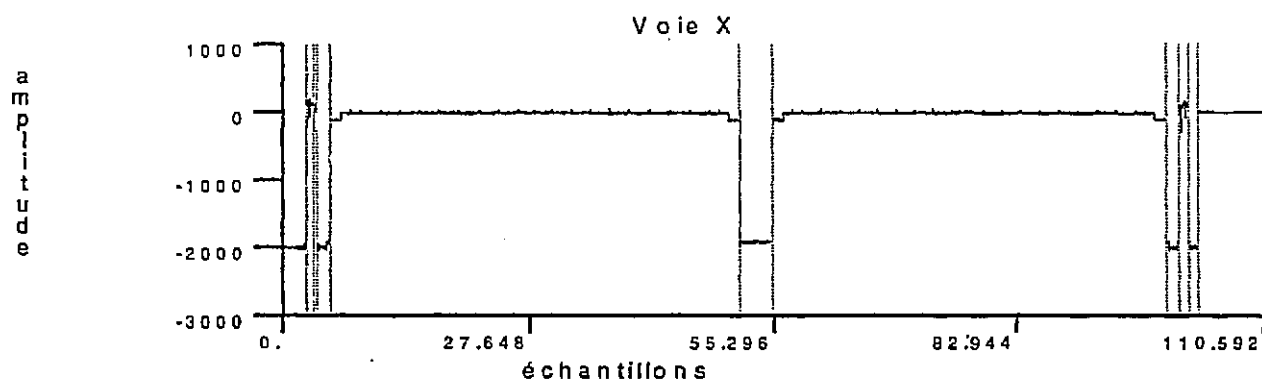
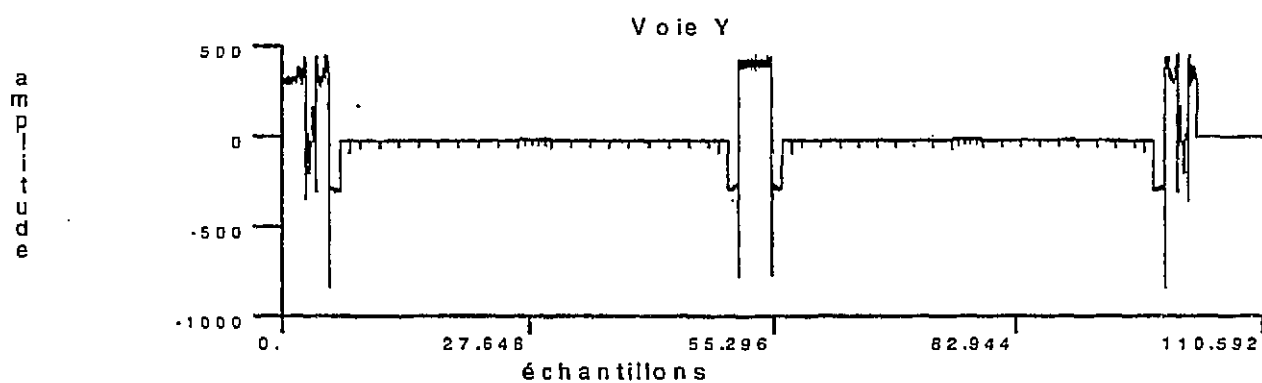
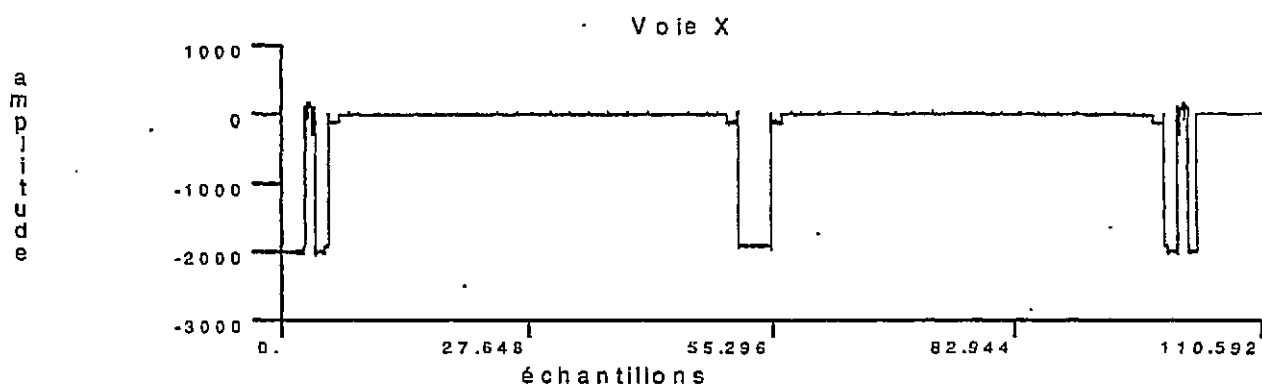


Figure 5 : GV001 VC1089 L015C079

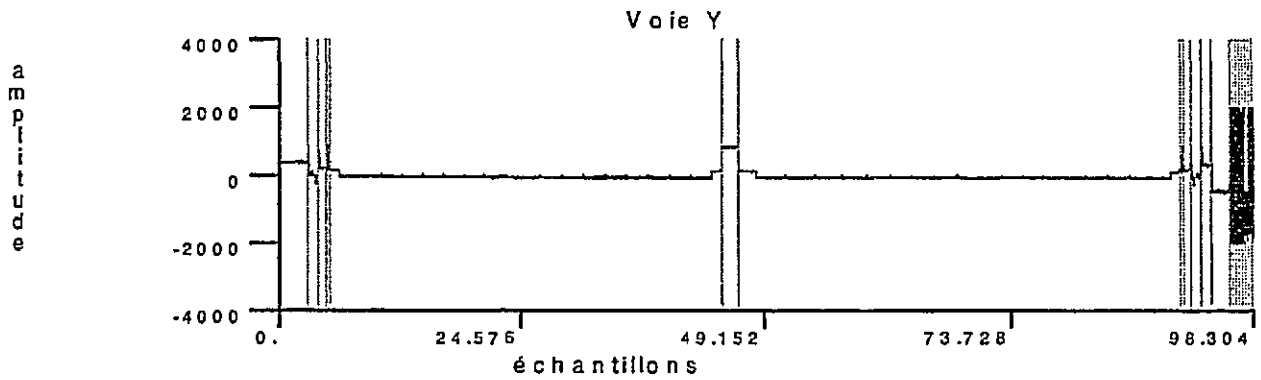
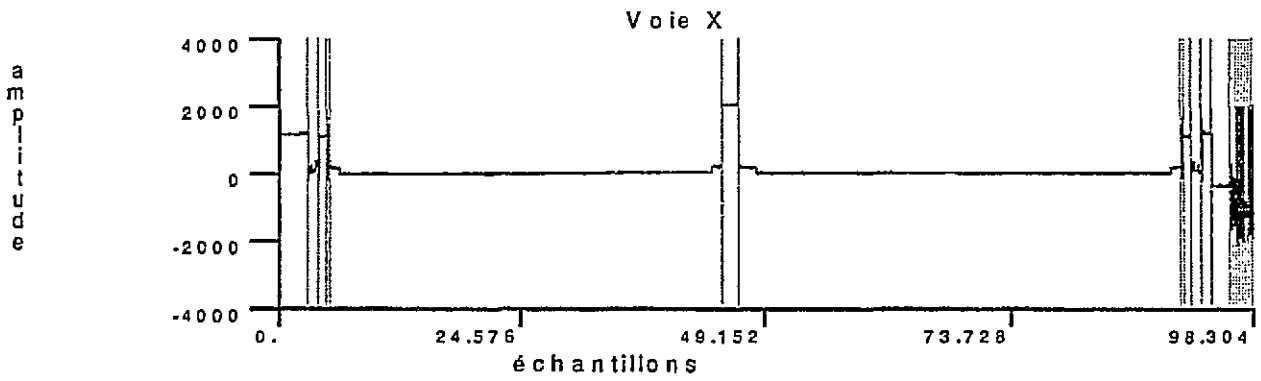
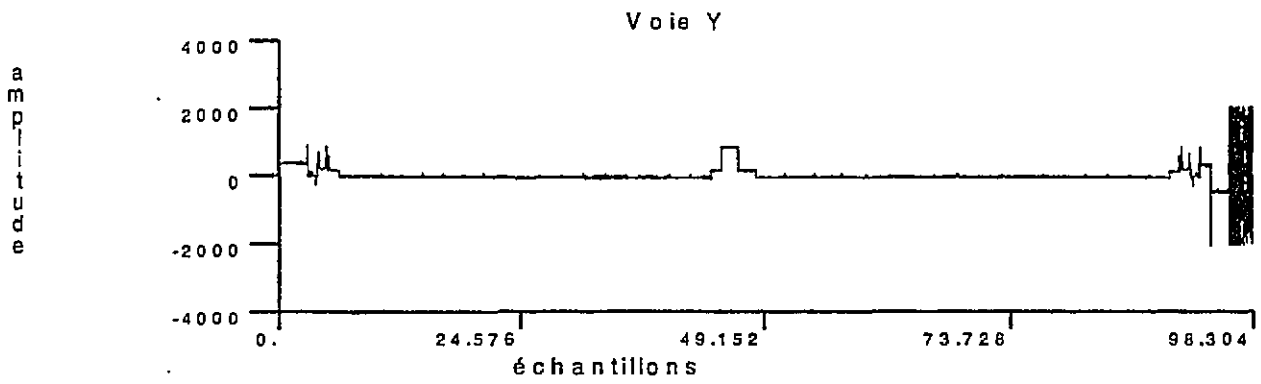
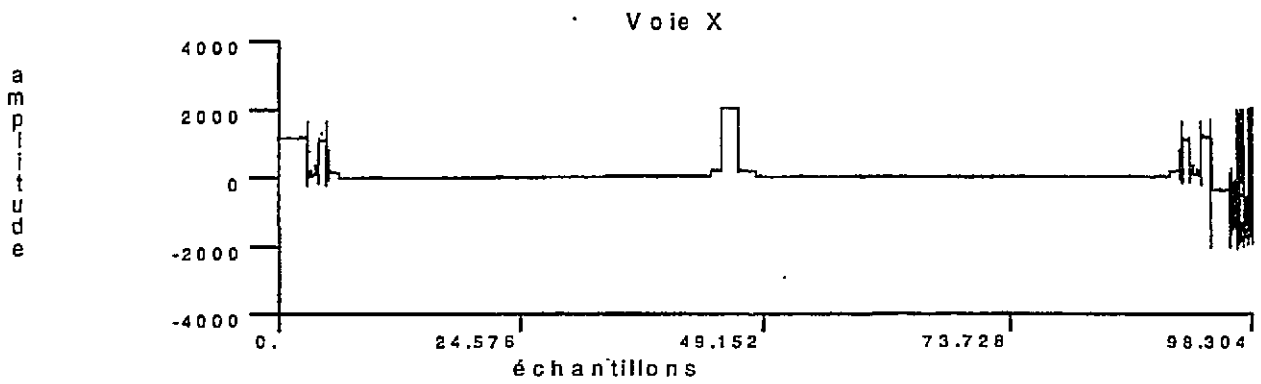


Figure 6 : GV193 VI0190 L036C041

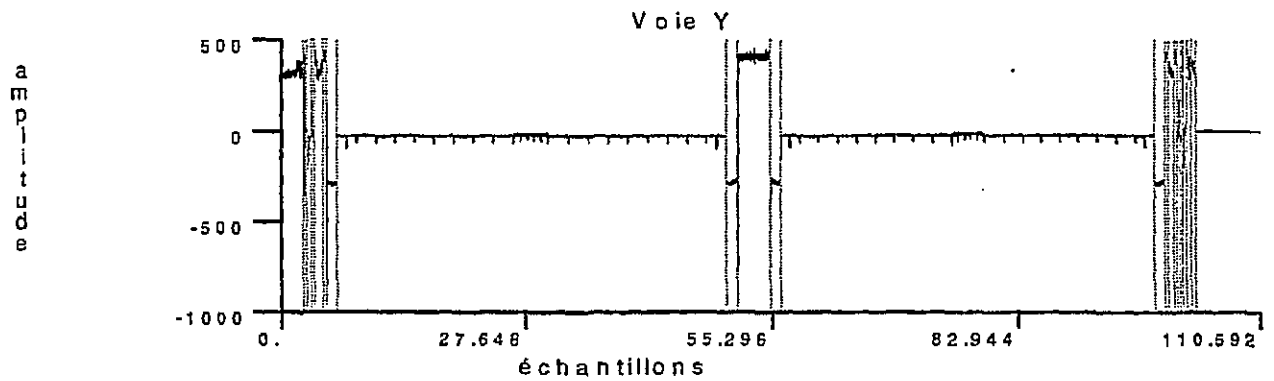
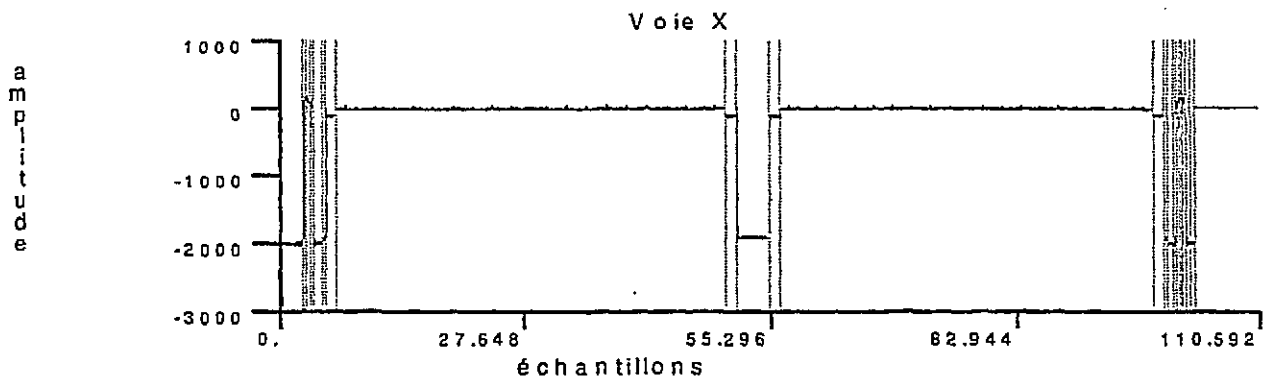
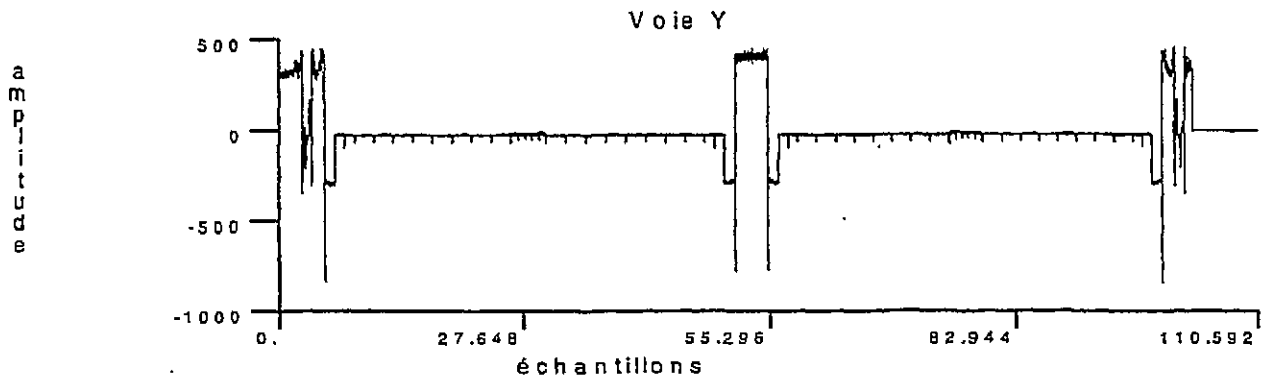
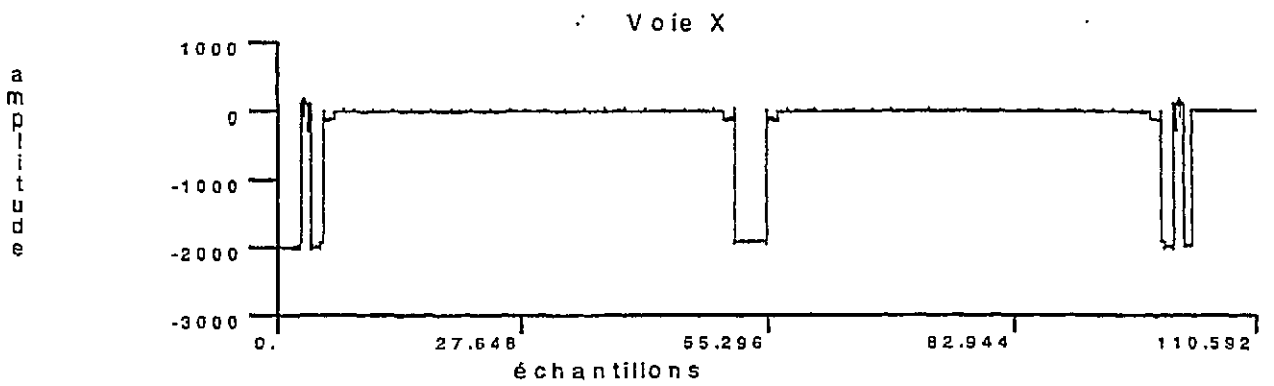


Figure 7 : GV001 VC1089 L015C079

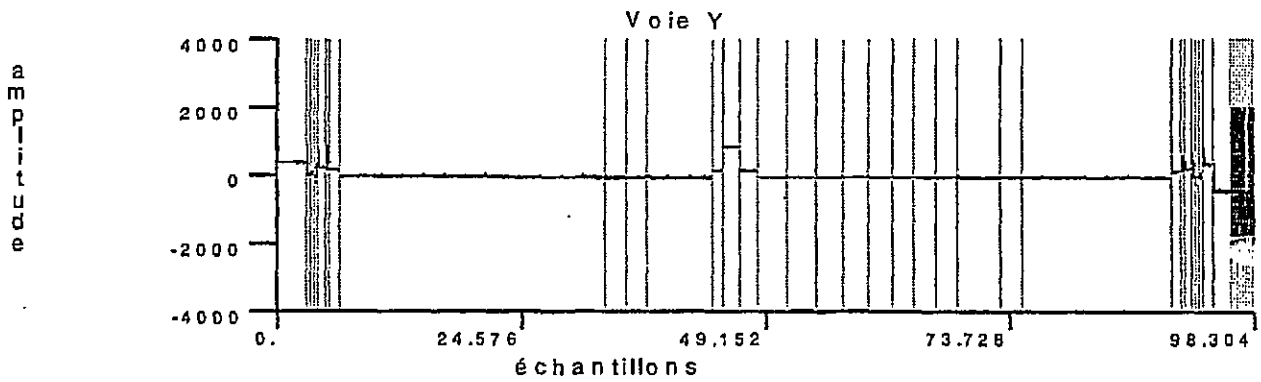
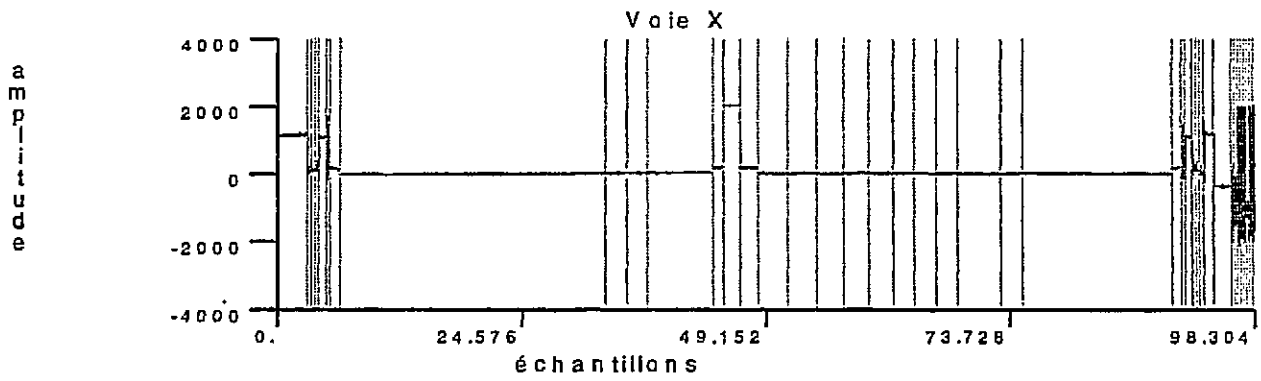
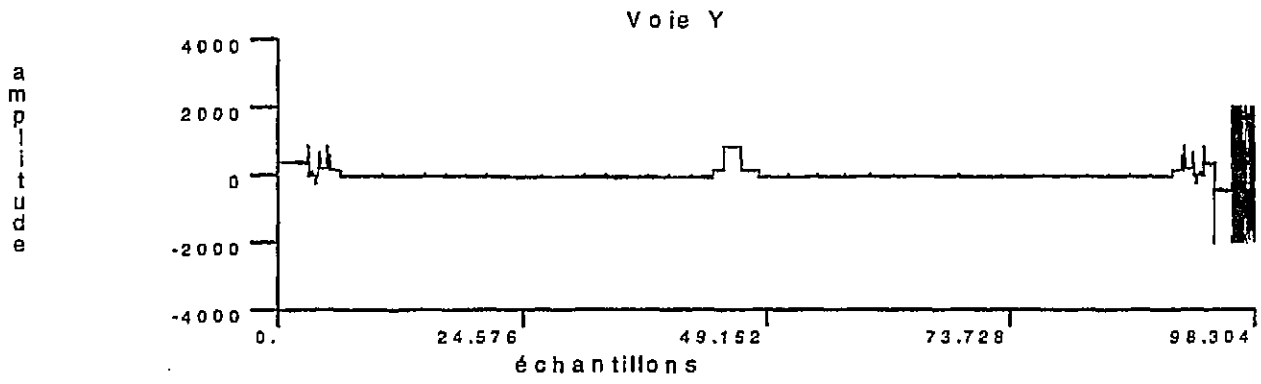
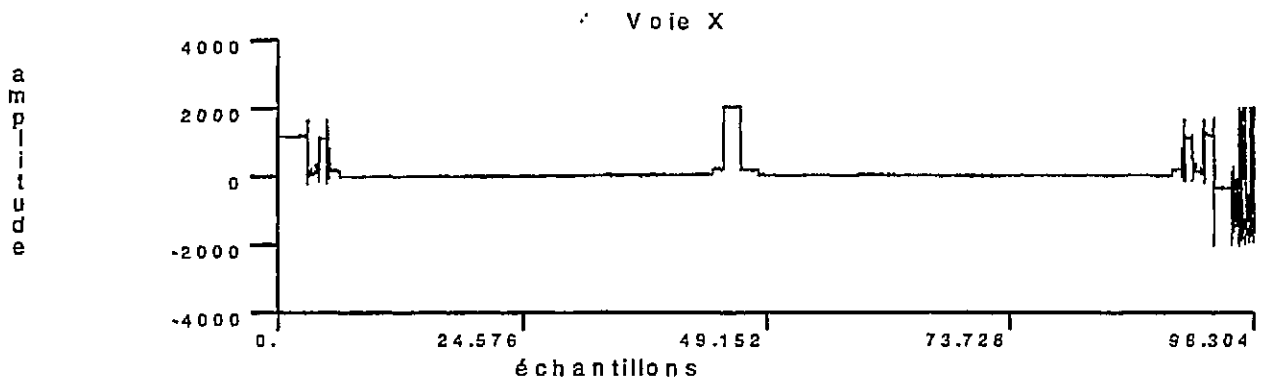
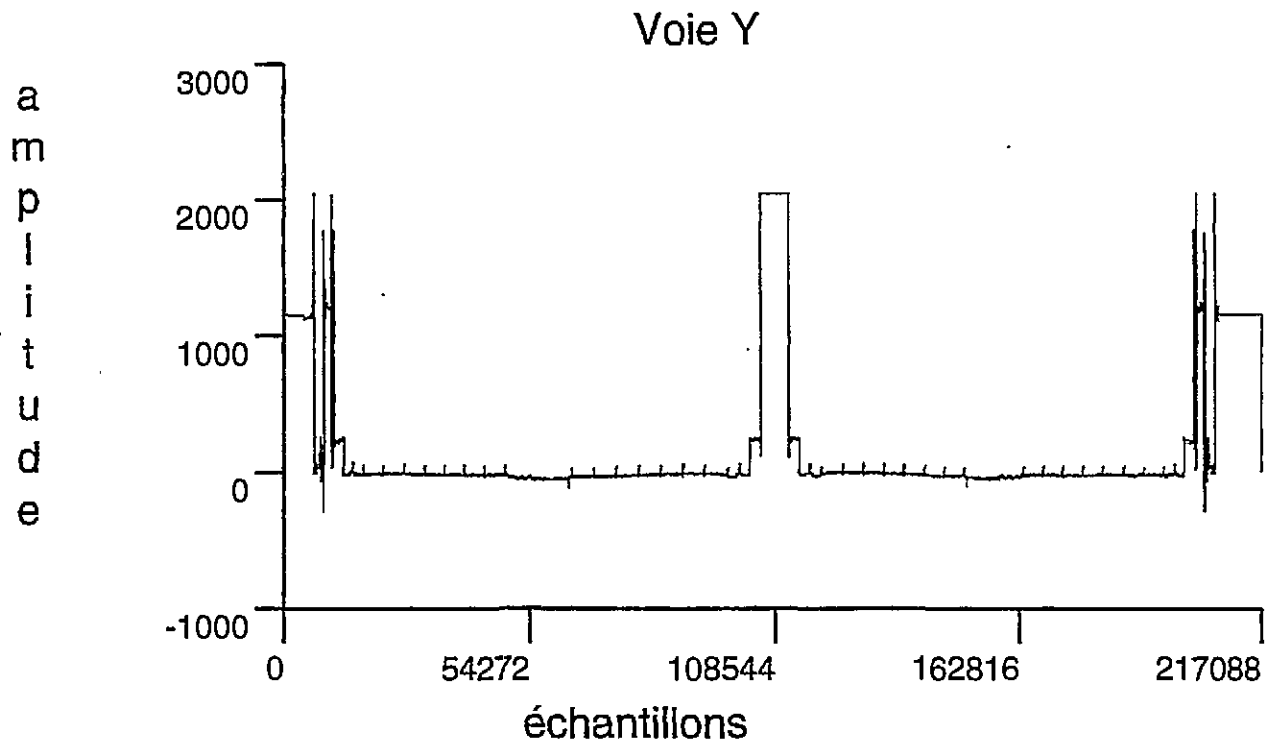
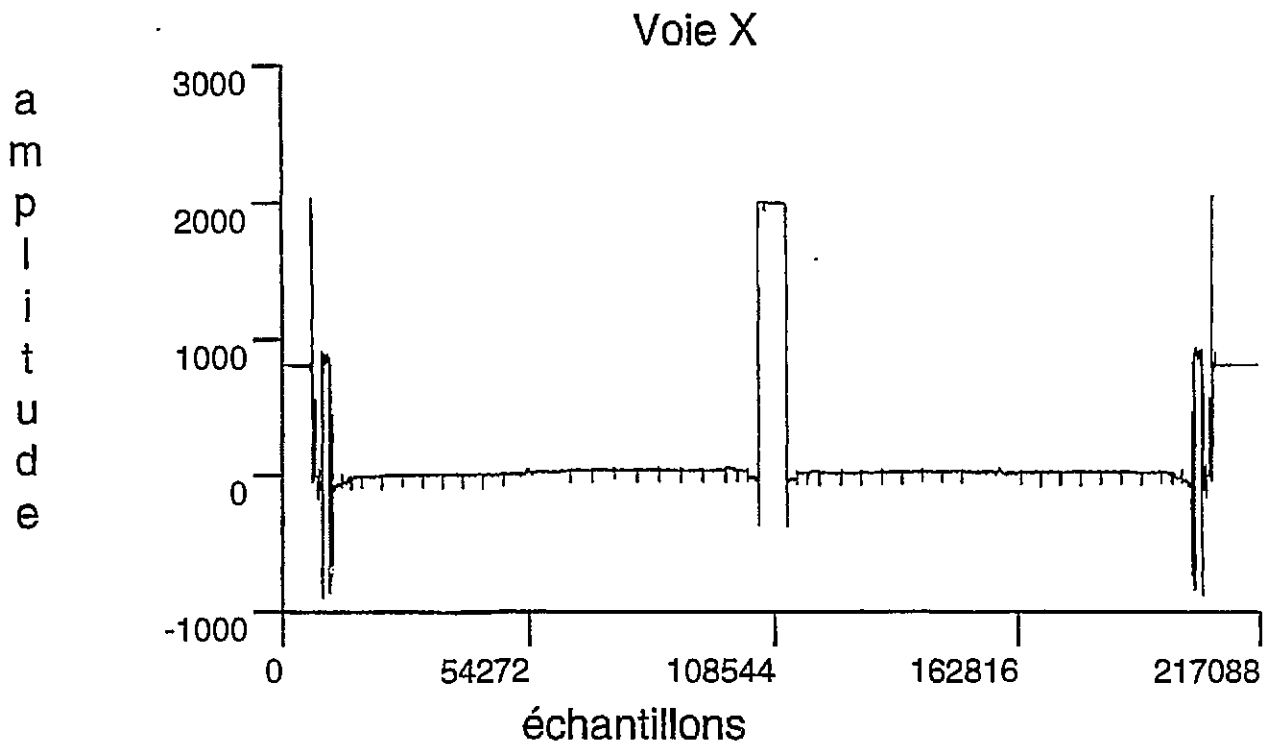


Figure 8 : G V 0 4 4 V P 0 7 9 0 L 0 3 1 C 0 4 8



Il ne semble pas intéressant de vouloir détecter les transitions plaque tubulaire/tube en même temps que les transitions de forte amplitude ; la probabilité de fausse alarme est fortement augmentée alors que la probabilité de détection des transitions plaque tubulaire/tube reste pour le moins assez faible.

1.5. Synthèse

L'algorithme de détection des transitions de forte amplitude sur la fréquence absolue des signaux courants de Foucault SAX par la méthode du test CUSUM de Page-Hinkley donne de très bons résultats, comparables à ceux obtenus avec la méthode empirique mise au point par le Groupe des Laboratoires.

En outre, il possède les mêmes avantages que la " méthode GDL " :

- une mise en œuvre aisée,
- une faible complexité,
- un temps de calcul limité.

Par contre, il offre la possibilité de connaître le sens de variation du signal (augmentation ou diminution) lors d'une transition. Ce paramètre, inutilisé à l'heure actuelle et non fourni par la " méthode GDL ", pourrait s'avérer utile lors de l'identification des transitions détectées.

Pour quantifier les performances intrinsèques de l'algorithme, il resterait à appliquer la méthode sur un grand nombre de signaux réels et à calculer effectivement les probabilités de détection et de fausse alarme.

2. DÉTECTION DE TRANSITOIRES DANS DES SIGNAUX BRUITÉS

2.1. Contexte

Le contrôle complet d'un tube de générateur de vapeur par sonde axiale à courants de Foucault fournit quatre signaux complexes obtenus à quatre fréquences différentes :

- une fréquence absolue (FA),
- trois fréquences différentielles (F1, F2 et F3).

Le tableau ci-dessous donne les valeurs des fréquences en fonction des différents paliers.

Fréquences de contrôle		
	900 MW	1300 MW
F1	500 kHz	600 kHz
F2	240 kHz	280 kHz
F3	100 kHz	120 kHz
FA	100 kHz	120 kHz

Les trois fréquences différentielles permettent de contrôler un tube à des profondeurs différentes (figure 9). La fréquence la plus élevée F1 est sensible aux événements présents sur la paroi interne du tube. La fréquence intermédiaire F2 permet de mettre en évidence les événements présents sur la paroi interne du tube ou dans l'épaisseur du tube. La fréquence la plus faible F3 est sensible aux événements présents sur la paroi interne du tube, dans l'épaisseur du tube ou sur sa paroi externe.

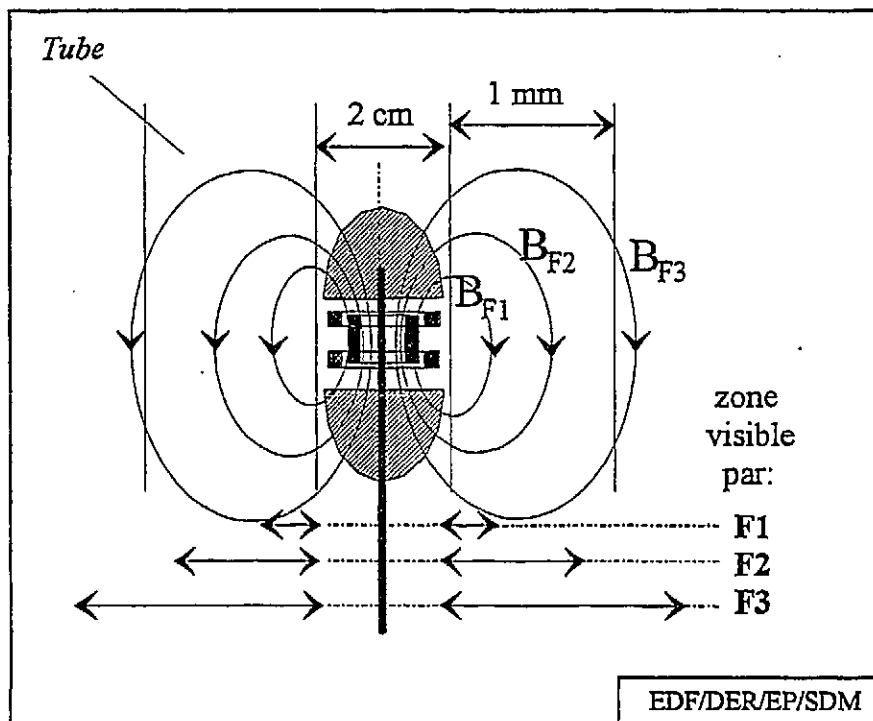


Figure 9 : Sensibilité spatiale de la sonde.

2.1.1. Enregistrement complet d'un contrôle

Les signaux de contrôle sont souvent perturbés par la présence de bruits d'origines diverses :

- le bruit d'excentration de la sonde dû aux oscillations de la sonde autour de l'axe de symétrie du tube,
- le bruit électronique ajouté par la conversion analogique-numérique des signaux ou divers parasites,
- le bruit métallurgique ou de surface engendré par le procédé de laminage utilisé.

S'il est possible de s'affranchir des bruits d'excentration et électronique, c'est beaucoup plus difficile pour le bruit de laminage.

Selon le procédé de laminage utilisé, les parois du tube sont plus ou moins "rugueuses" (figure 10).

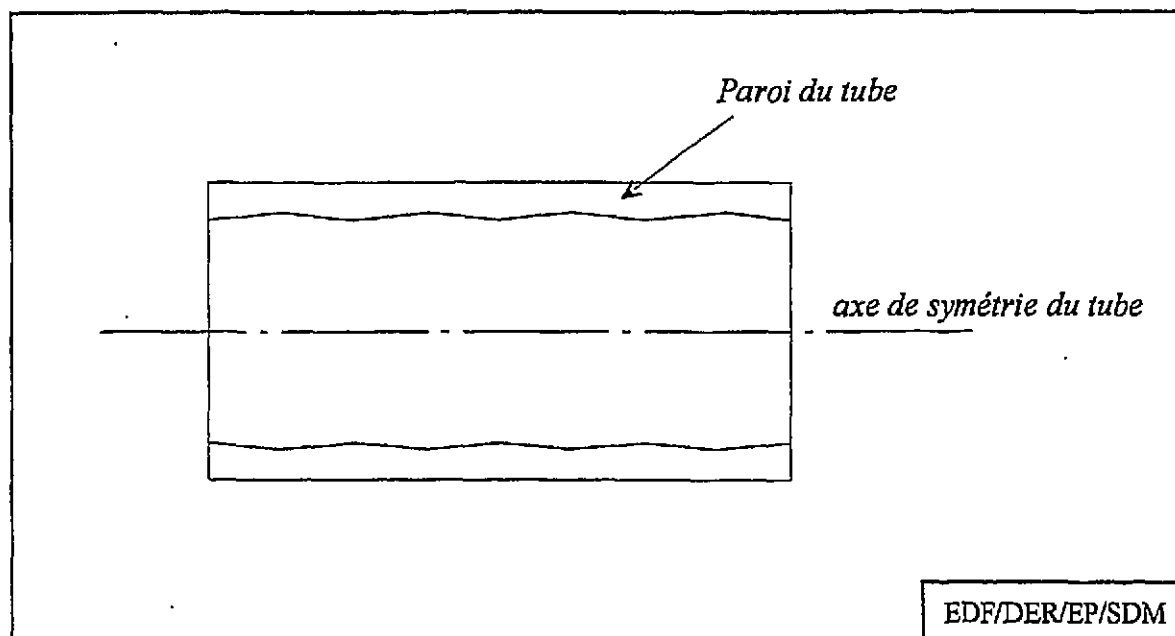


Figure 10 : Surface interne d'un tube laminé.

Lors du contrôle, la sonde sensible à ces irrégularités de surface produit un signal correspondant au profil interne du tube : c'est le bruit de surface aussi appelé bruit de laminage. Par nature, le signal à la fréquence F1 est le plus affecté par ce bruit de laminage.

Dans la majorité des cas, le bruit de surface reste de faible amplitude et ne gêne pas l'analyse des signaux de contrôle. Il empêche seulement la détection des transitoires caractéristiques des défauts de faible importance présents sur les parois internes des tubes. Il est très intéressant de détecter tôt ces défauts pour suivre leur évolution et améliorer les plans de contrôle, néanmoins leur "non-détection" n'a aucune conséquence sur la sûreté des installations contrôlées.

Par contre, sur certains sites, les contrôles ont révélé la présence de bruit de fond d'amplitude similaire à celle des transitoires caractéristiques des défauts. L'expertise des tubes s'avère, dans ce cas, très délicate voire impossible. Il est alors nécessaire de s'affranchir du bruit de surface.

2.1.2. Cas particulier de la zone de cintre

Dans la partie cintrée, le bruit de laminage est amplifié par les perturbations induites par l'opération mécanique de cintrage du tube. Celle-ci déforme les tubes et a tendance à accentuer les irrégularités de surface sur les parois internes des tubes. Ces perturbations s'avèrent d'autant plus importantes que le diamètre du cintre est faible.

Ces perturbations supplémentaires se traduisent par :

- un signal à la fréquence F1 beaucoup plus " chahuté " que sur les autres zones,
- des signaux aux fréquences F2 et F3 passablement bruités, alors qu'ils ne le sont généralement pas ou peu sur les autres zones.

Là encore, il est intéressant de déceler les événements malgré le bruit et ce le plus tôt possible.

2.2. Méthode

2.2.1. Présentation

L'objectif est de détecter des événements utiles dans des signaux fortement bruités. Dans le cas des signaux courants de Foucault, les spectres du bruit et du signal utile sont assez proches, mais ne sont pas rigoureusement identiques. L'idée est alors d'exploiter les différences fréquentielles entre le bruit et le signal utile.

Pour ce faire, nous avons choisi d'utiliser la transformation par ondelettes continues, avec un nombre restreint de voies de décomposition.

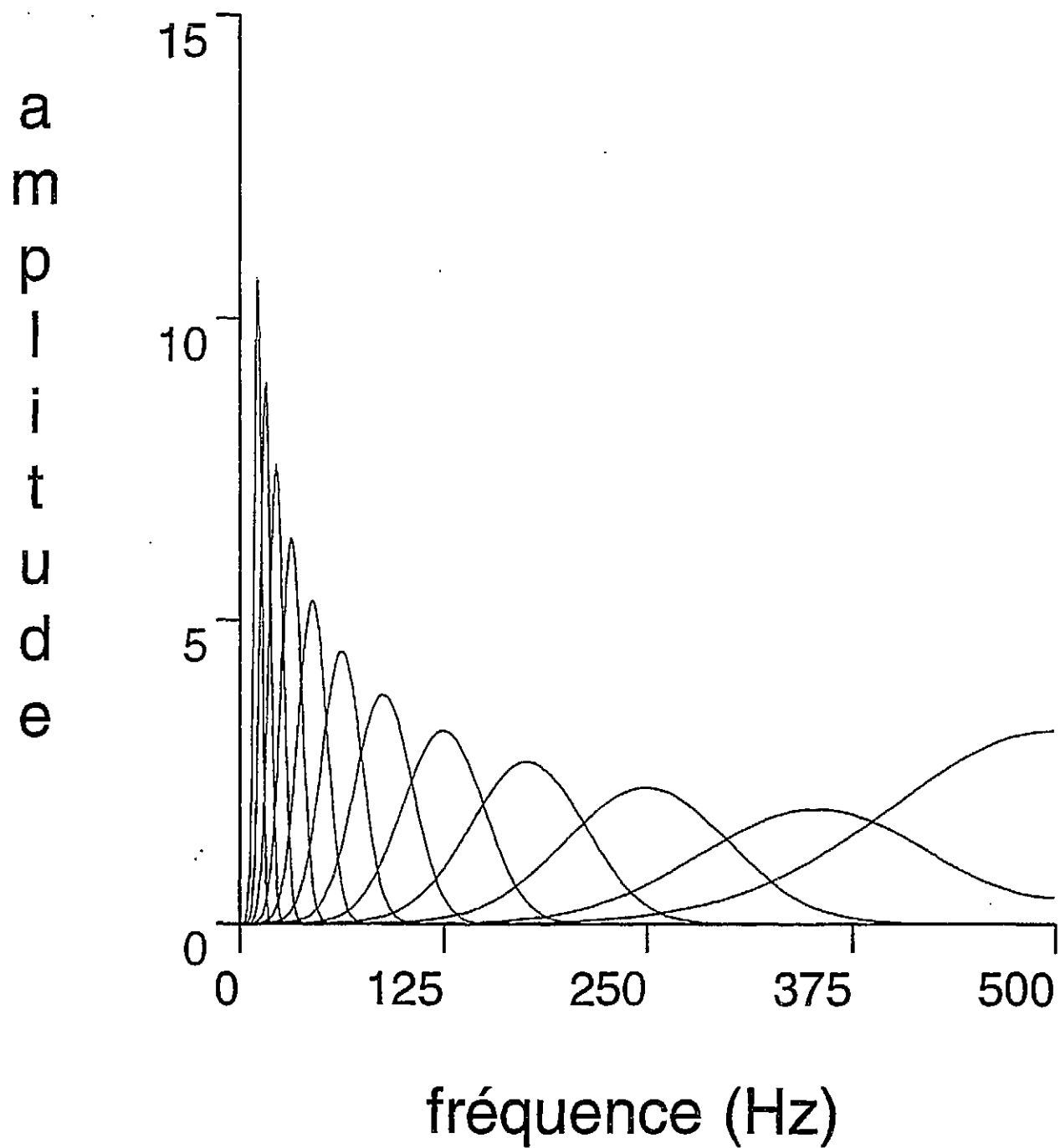
Le signal est décomposé sur $n \times m$ ondelettes de Morlet régulièrement réparties sur n octaves, soit m voies de décomposition par octave. Cette décomposition s'interprète aussi comme le filtrage du signal par un banc de $n \times m$ filtres passe-bande non-uniformes $F_{k,l}$, régulièrement répartis sur n octaves successives et dont les fréquences centrales sont données par la formule suivante :

$$f_{k,l}^c = \frac{f_c}{2^{k+\frac{l}{m}}} \text{ avec } k \in \{1, 2, \dots, n\} \text{ et } l \in \{1, \dots, m-1\}$$

La figure 11 présente les gabarits des filtres utilisés dans le cas particulier d'une décomposition sur six octaves, à deux voies par octave ($n=6$, $m=2$).

La décomposition fournit donc, à partir d'un signal initial, $n \times m$ voies. Chaque voie correspond au signal initial filtré passe-bande par l'un des filtres $F_{k,l}$. La détection de transitoires caractéristiques de défauts est ensuite faite à partir du signal et des $n \times m$ voies de décomposition prises conjointement.

Figure 11 : Gabarits des filtres ($n=6$, $m=2$)



2.2.2. Algorithme

Étape 1 : décomposition du signal $s(t)$ en $n \times m$ voies $s_{k,l}(t)$

$$s_{k,l}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^{k+\frac{l}{m}} 2^\delta}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(u) \psi^* \left(\frac{u-t}{2^{k+\frac{l}{m}} 2^\delta} \right) du$$

$$\psi(t) = \cos(5t) e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (\text{formulation réelle})$$

$$\psi(t) = e^{5it} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (\text{formulation complexe})$$

avec $s(t)$: signal initial,

$s_{k,l}(t)$: signal décomposé sur la voie l de l'octave k ,

$\psi(t)$: ondelette de Morlet,

δ : paramètre réglé de telle sorte que la fréquence centrale de $F_{1,0}$ soit $f_e/2$, soit

$$\delta = \frac{\ln 5 - \ln \pi}{\ln 2} \approx 0,67$$

Étape 2 : détection des transitoires sur le signal initial et chaque voie de la décomposition.

Étape 3 : prise de décision sur la présence de transitoires dans le signal initial à partir des résultats des détections effectuées sur celui-ci et sur les différentes voies de la décomposition.

2.3. Mise en œuvre

2.3.1. Limitation du nombre de voies de la décomposition

Les signaux courants de Foucault sont échantillonnés à 1 kHz ou 2 kHz. Lorsqu'ils sont échantillonnés à 2 kHz lors du contrôle, pour l'expertise ils sont sous-échantillonnés par 2 pour être traités comme les signaux échantillonnés à 1 kHz. Nous considérons dans la suite que les signaux à traiter sont échantillonnés à 1 kHz.

Il a été montré dans [POU87] que la bande utile des transitoires caractéristiques de défauts peut être restreinte à la bande [4 Hz, 150 Hz]. Les fréquences centrales des filtres $F_{1,0}$ et $F_{2,0}$ sont respectivement :

$$f_{1,0}^c = \frac{f_e}{2} = 500 \text{ Hz} \quad \text{et} \quad f_{2,0}^c = \frac{f_e}{4} = 250 \text{ Hz}$$

La décomposition du signal sur les deux premières octaves n'apporte donc aucune information supplémentaire sur les transitoires.

Par contre, il est intéressant d'analyser plus finement le comportement fréquentiel du signal entre :

$$f_{3,0}^c = \frac{f_e}{8} = 125 \text{ Hz} \quad \text{et} \quad f_{6,0}^c = \frac{f_e}{64} = 15,625 \text{ Hz}$$

En pratique, le signal est décomposé sur les octaves 3, 4, 5 et 6, et sur 2 voies par octave. La décomposition comprend au total 8 voies.

La formule de décomposition devient :

$$s_{k,l}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^{k+\frac{l}{2}}2^\sigma}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(u) \psi^* \left(\frac{u-t}{2^{k+\frac{l}{2}}2^\sigma} \right) du$$

avec $k \in \{3, 4, 5, 6\}$,

$l \in \{0, 1\}$,

$s_{k,l}(t)$: signal décomposé sur la voie l de l'octave k .

2.3.2. Détection des transitoires

Chaque voie de la décomposition est considérée comme un signal à part entière. La détection est faite sur le signal initial et sur chaque voie de la décomposition selon le critère de puissance suivant :

" tout événement dont la puissance instantanée (calculée sur un nombre limité d'échantillons) est supérieure à 2 fois l'écart-type du signal (calculé sur la totalité des échantillons) est considéré comme un transitoire "

2.3.3. Décision

La détection d'un transitoire "utile" dans le signal initial est finalement prise en fonction des détections faites sur le signal lui-même et sur les voies de la décomposition par ondelettes.

La règle de décision utilisée est la suivante :

" un transitoire est détecté sur le signal initial si un événement est effectivement détecté sur le signal lui-même ou si un événement est détecté en coïncidence sur au moins 3 voies de la décomposition, dont au moins 2 voies sur les octaves 3 ou 4 "

2.3.4. Choix du signal utilisé

Les signaux courants de Foucault traités sont des signaux complexes. Deux solutions sont alors possibles :

- 1 - décomposer indépendamment les voies x et y du signal. Un transitoire est alors détecté sur le signal s'il est détecté sur la décomposition de x ou sur celle de y.
- 2 - décomposer directement le signal complexe. Les voies de décomposition obtenues sont alors complexes. La détection des transitoires et la décision sont ensuite effectuées à partir des modules des voies de la " décomposition complexe "

En pratique, l'une des deux composantes est plus bruitée que l'autre. Dans ce cas, le module donne de moins bons résultats que la composante la moins bruitée. Il est préférable d'employer la première méthode, mais elle nécessite de déceler au préalable la composante la moins bruitée.

Dans la suite, les deux approches sont envisagées.

2.4. Résultats

2.4.1. Essai sur signaux de synthèse

Les signaux de test sont réalisés par addition d'un signal réel de défaut et d'un signal réel de bruit pur selon :

$$s_{test}(t) = s(t) + \alpha b(t)$$

avec $s_{test}(t)$: signal de test synthétisé,
 $s(t)$: signal de défaut réel,
 α : coefficient de mélange,
 $b(t)$: bruit réel.

Le contrôle du rapport signal sur bruit du signal de test se fait par l'intermédiaire du coefficient de mélange α .

Selon le principe de l'additivité des signaux courants de Foucault, vérifié dans [CLO92], qui veut que " *plusieurs signaux d'événements élémentaires additionnés donnent le même signal que le signal correspondant à la superposition réelle des événements* ", les signaux synthétisés peuvent être considérés comme de bonnes approximations des signaux réels bruités.

Deux signaux réels de défauts sont utilisés (figures 12, 13 et 14) :

- un signal de gorge interne circonférentielle de 2 mm de largeur et de 0.95 mm de profondeur (soit 75% de l'épaisseur du tube),
- un signal de gorge interne circonférentielle de 2 mm de largeur et de 0.16 mm de profondeur (soit 12.6% de l'épaisseur du tube).

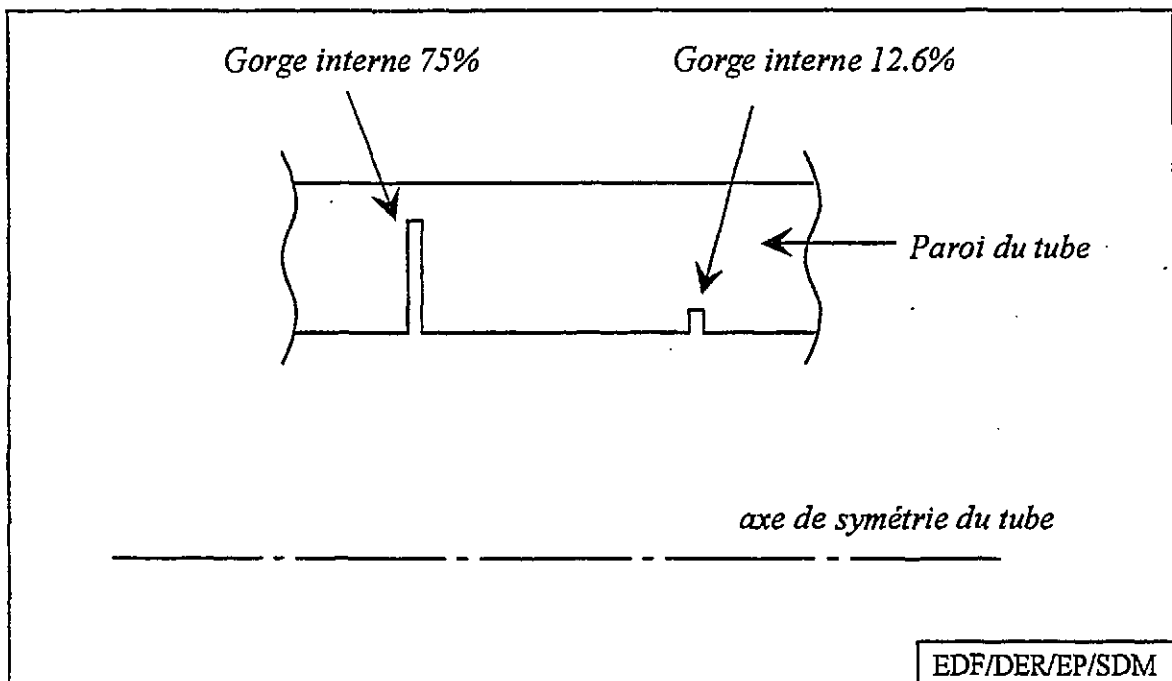
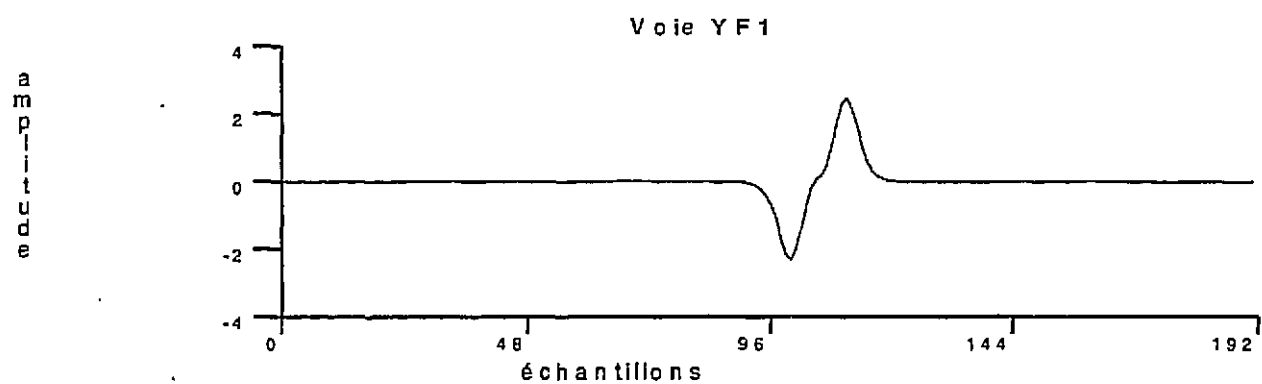
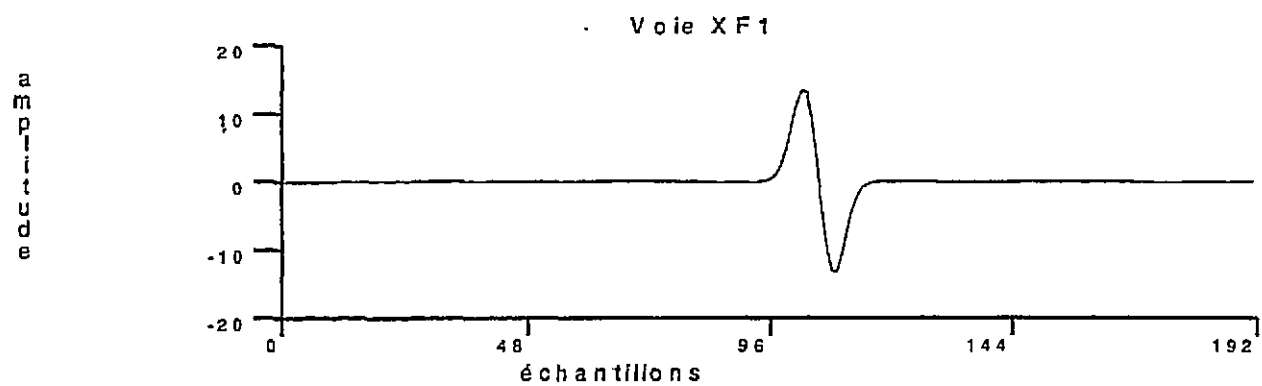


Figure 12 : Schéma des défauts utilisés

Figure 13 : Gorge interne 75%



Lissajous

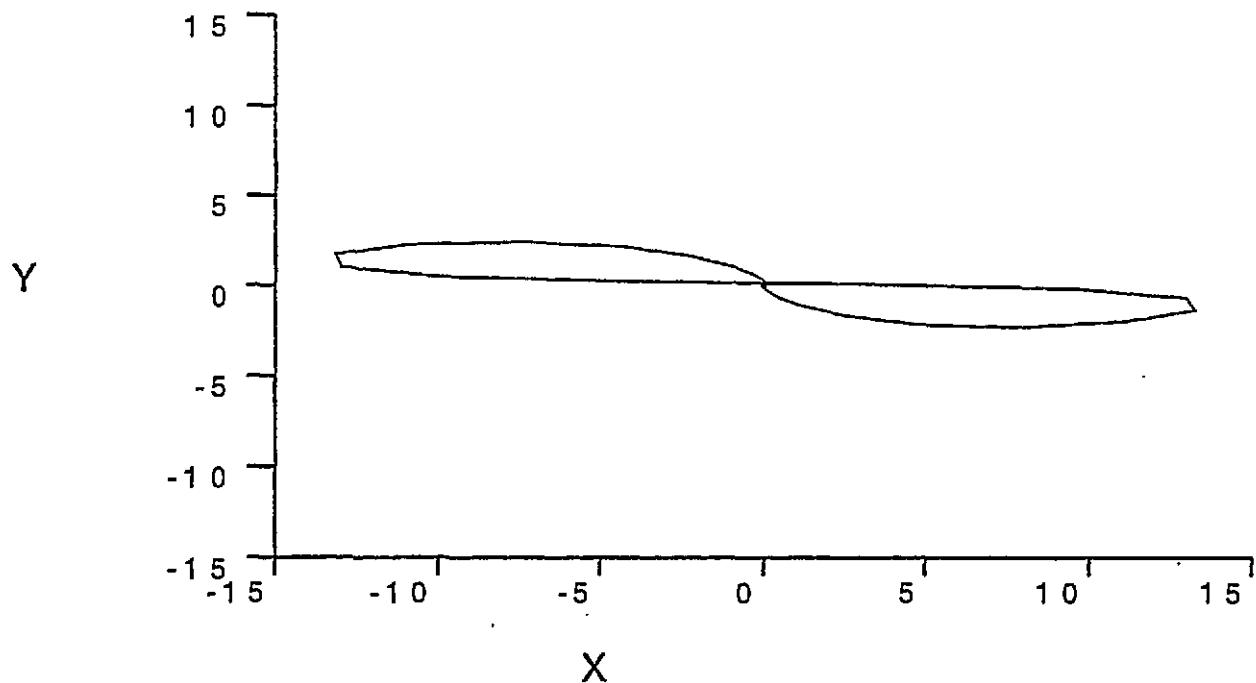


Figure 14 : Gorge interne 12.6%

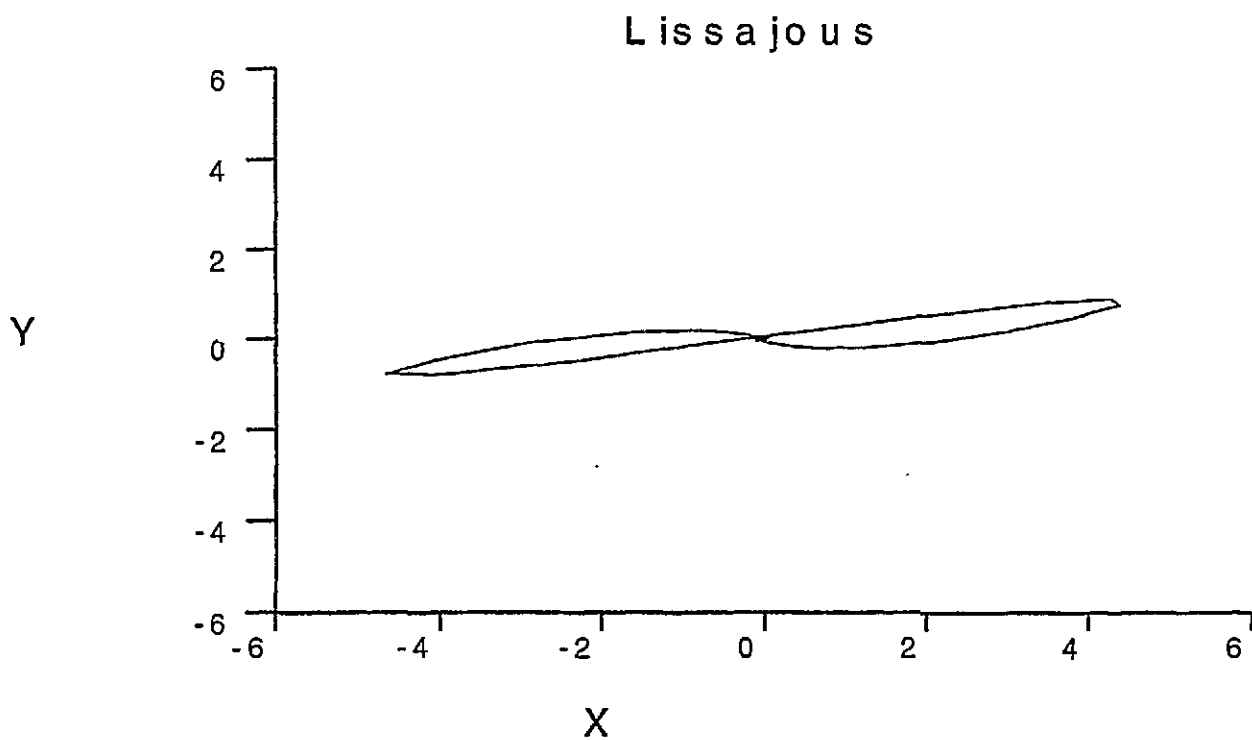
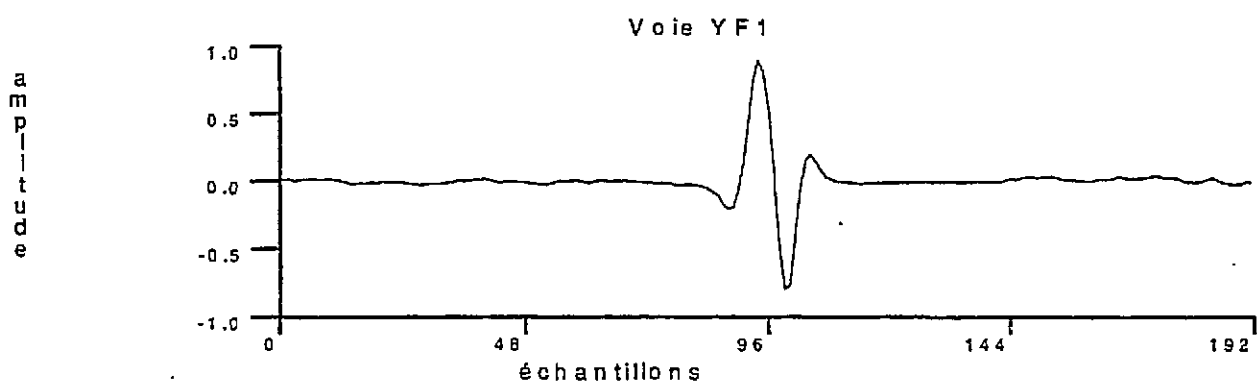
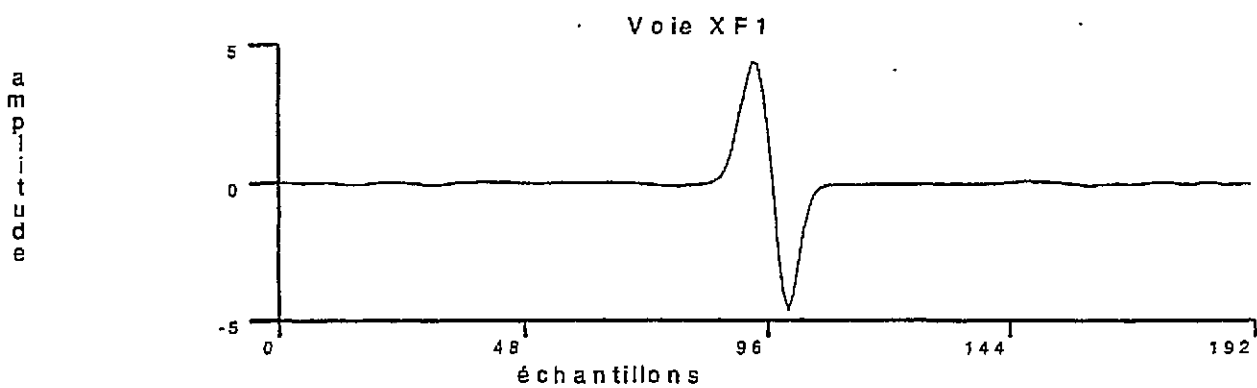


Figure 15 : Bruit de fond du GV1

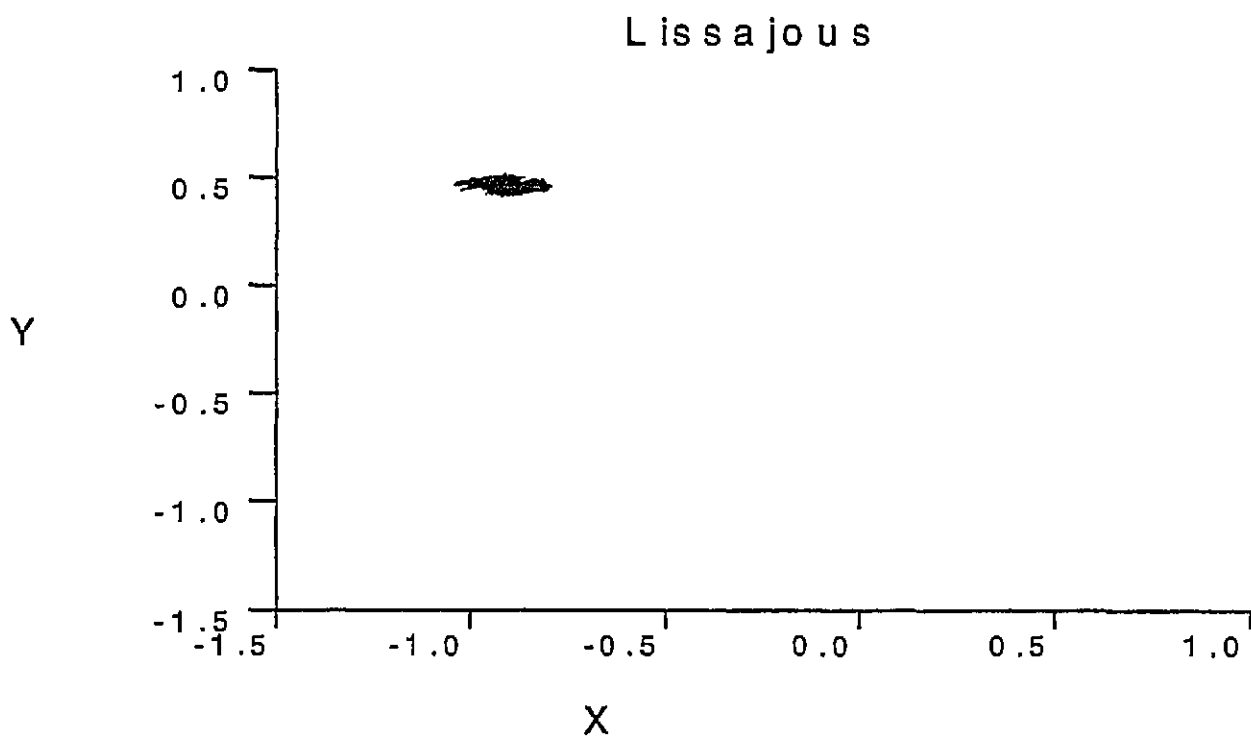
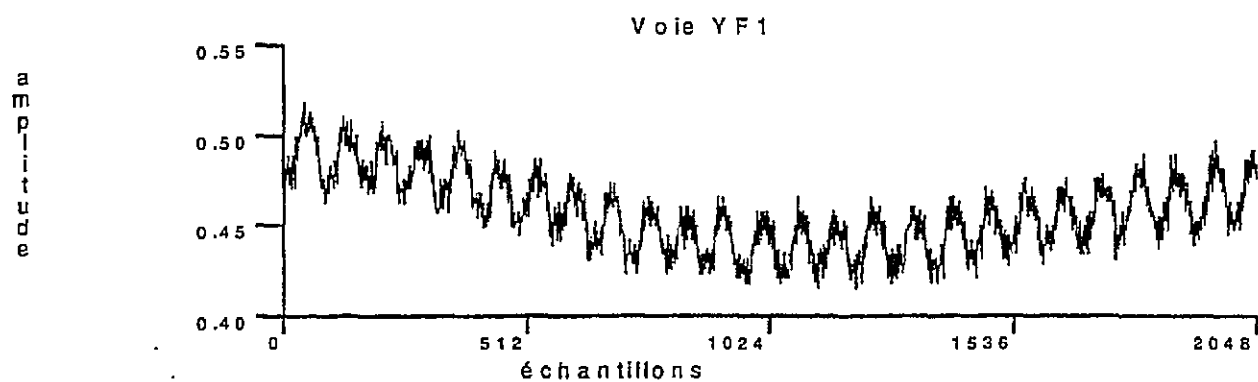
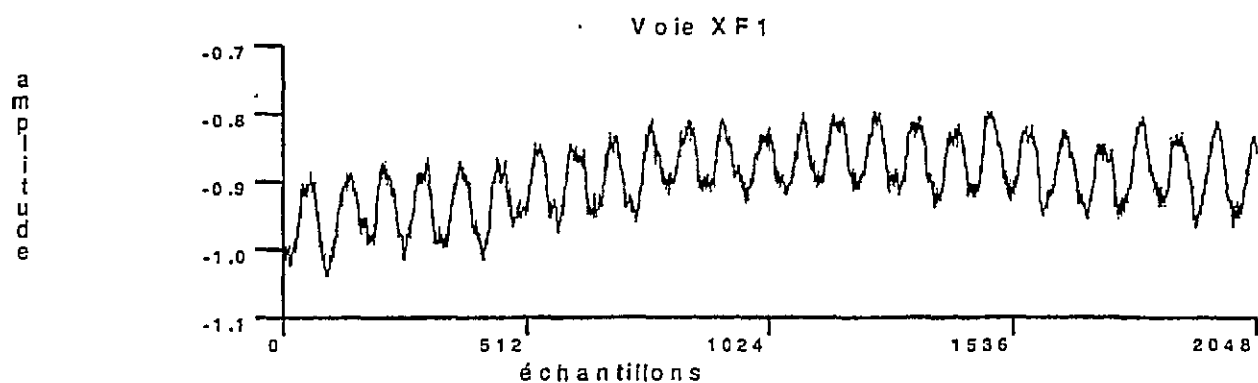


Figure 16 : Bruit de fond du GV80

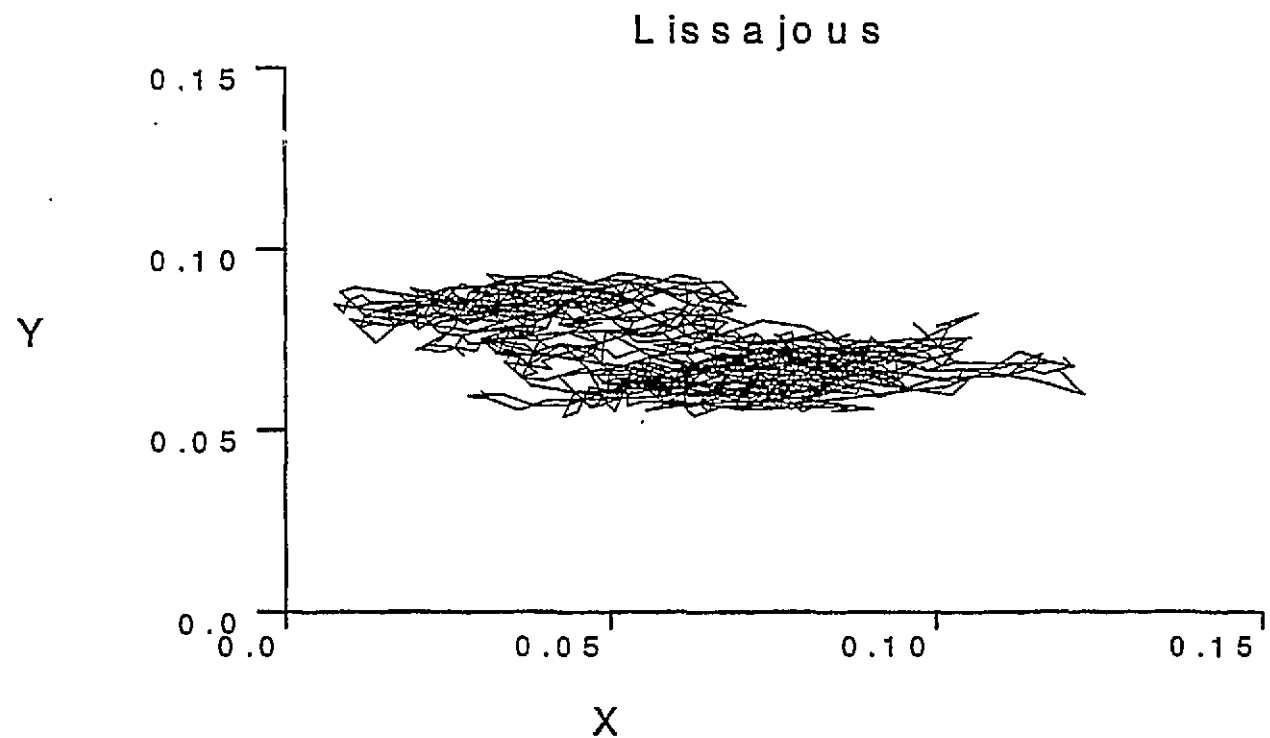
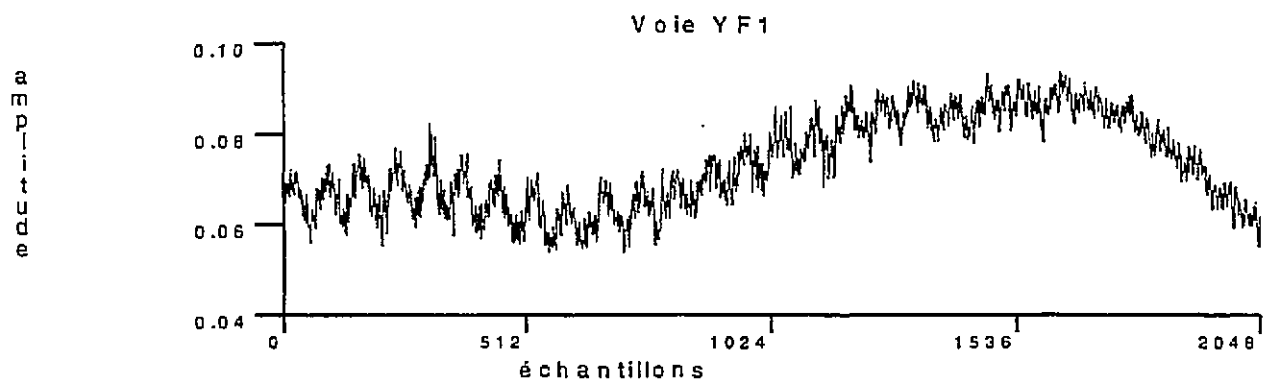
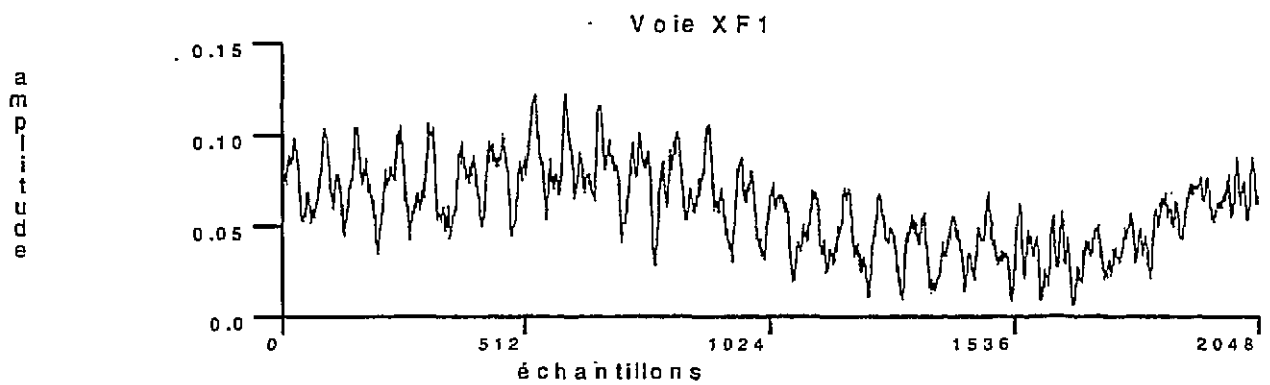
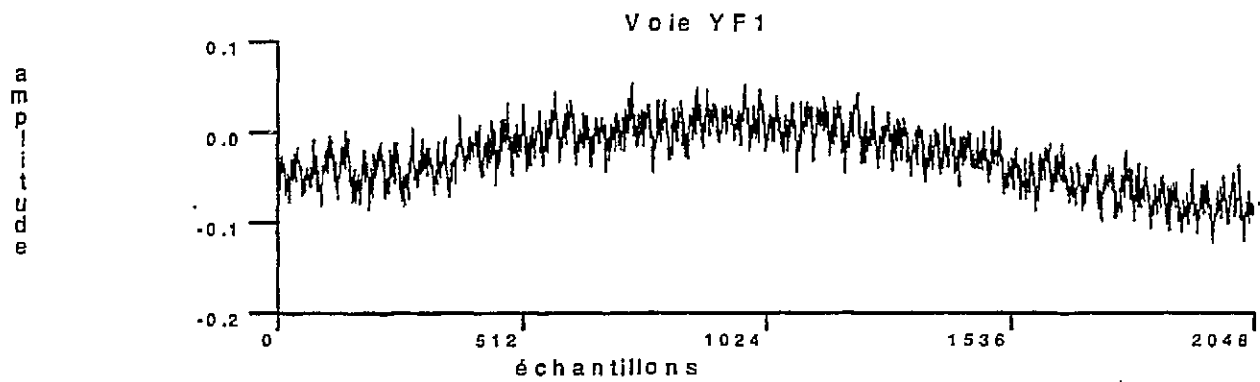
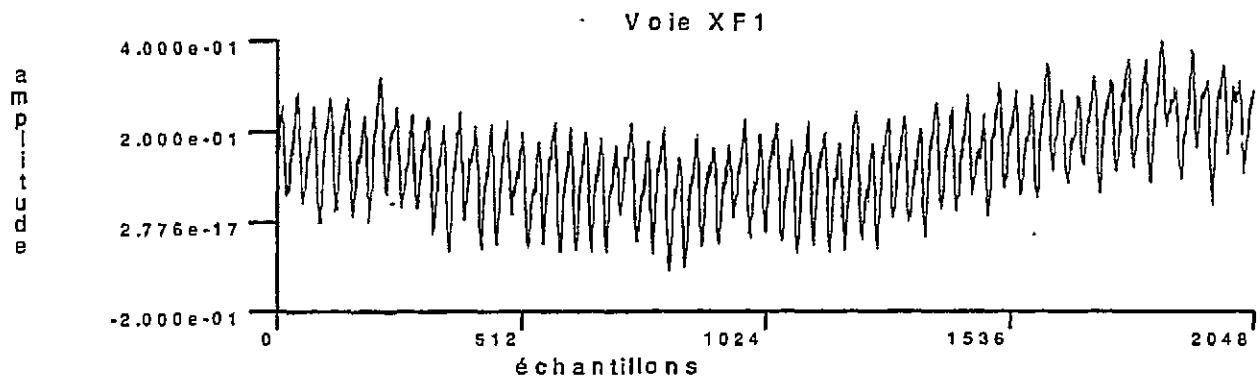
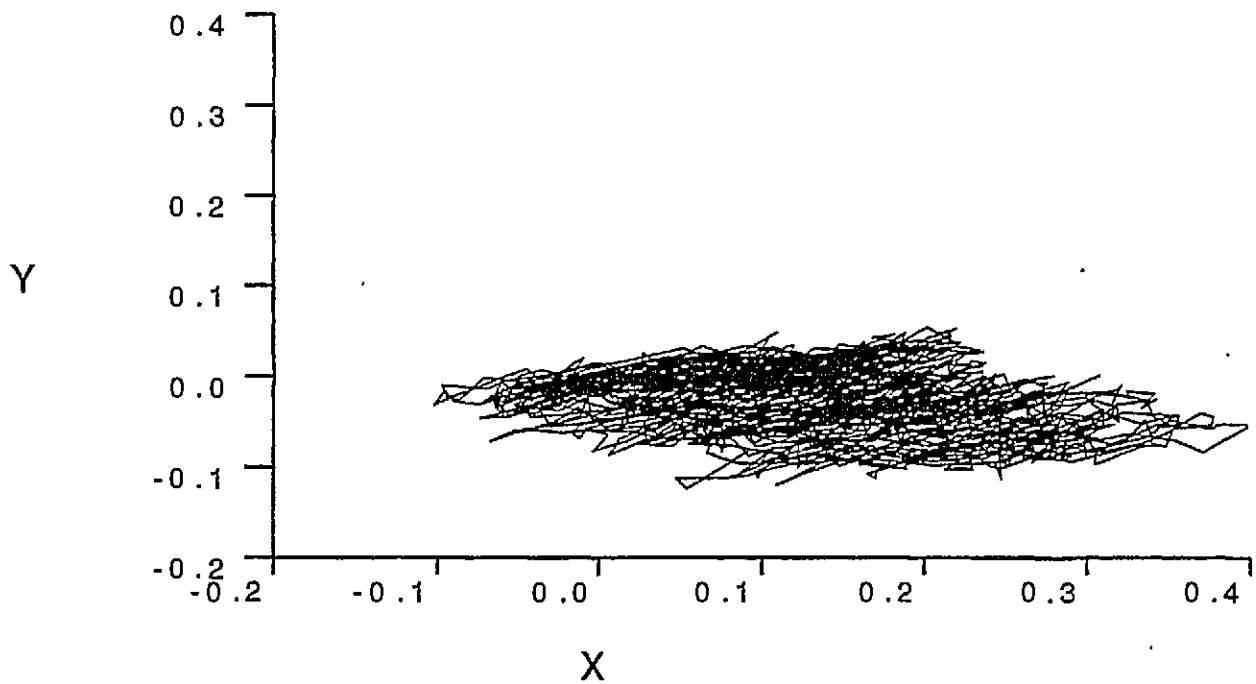


Figure 17 : Bruit de fond du GV167



Lissajous



Les signaux de bruit proviennent directement de signaux réels de contrôle de tubes. Ils sont extraits sur des zones expertisées comme saines (c'est-à-dire ne comportant aucun défaut). Trois types de bruit provenant de contrôles de générateurs de vapeur différents sont utilisés :

- un signal de bruit extrait du GV 1 (figure 15),
- un signal de bruit extrait du GV 80 (figure 16),
- un signal de bruit extrait du GV 167 (figure 17).

En jouant sur le coefficient de mélange α , il est possible d'obtenir des signaux de synthèse avec différents rapports signal sur bruit.

L'algorithme a été appliqué sur les six signaux de synthèse obtenus par combinaison entre les deux signaux de défaut et les trois types de bruit.

Pour évaluer l'intérêt de l'algorithme, on recherche pour chaque signal à partir de quels rapports signal sur bruit la décomposition par ondelettes apporte un plus par rapport à un algorithme, utilisant le même critère de détection, mais ne travaillant que sur le signal initial.

Les figures 18 et 19 présentent les résultats obtenus sur le mélange fait de la gorge interne 12.6% et du bruit issu du GV 1. Sur la figure 18, le rapport signal sur bruit est suffisant et le transitoire est détecté à la fois directement sur le signal et sur les voies de la décomposition. Sur la figure 19, le rapport signal sur bruit est dégradé de 5 dB par rapport à la figure précédente. Le transitoire n'est plus détecté que sur les voies de la décomposition.

Les figures 20 et 21 présentent les résultats obtenus avec la décomposition complexe et la détection sur les modules des voies de décomposition. Les résultats sont comparables à ceux obtenus par la version réelle de l'algorithme.

L'utilisation de la transformée par ondelettes – et donc de l'algorithme présenté – permet de détecter un transitoire avec un rapport signal sur bruit plus faible en moyenne de 5 dB par rapport à une détection directe.

Figure 18 : Signal test (G1 12.6% + BF GV1)

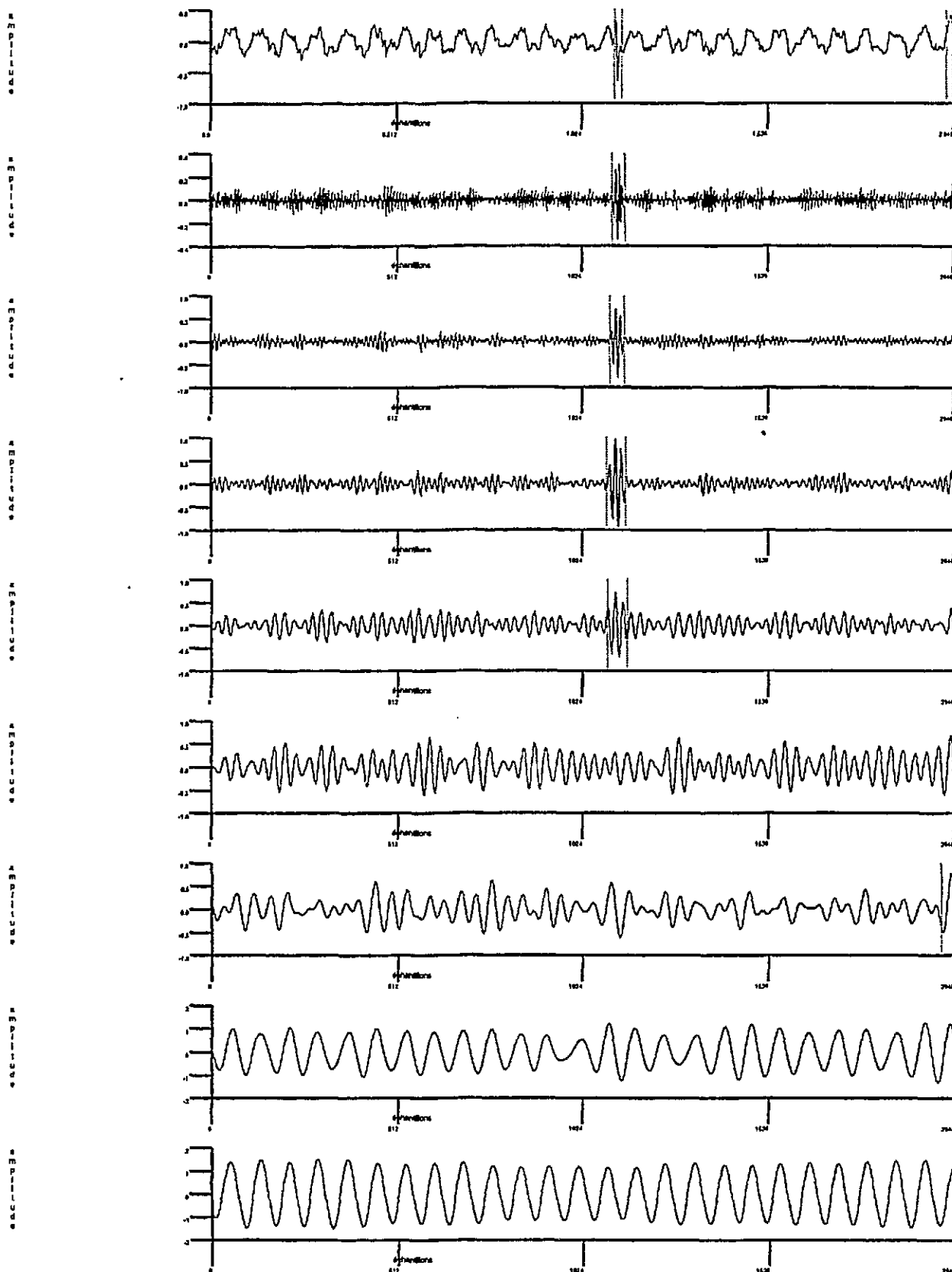


Figure 19 : Signal test (GI 12.6% + BF GV1)

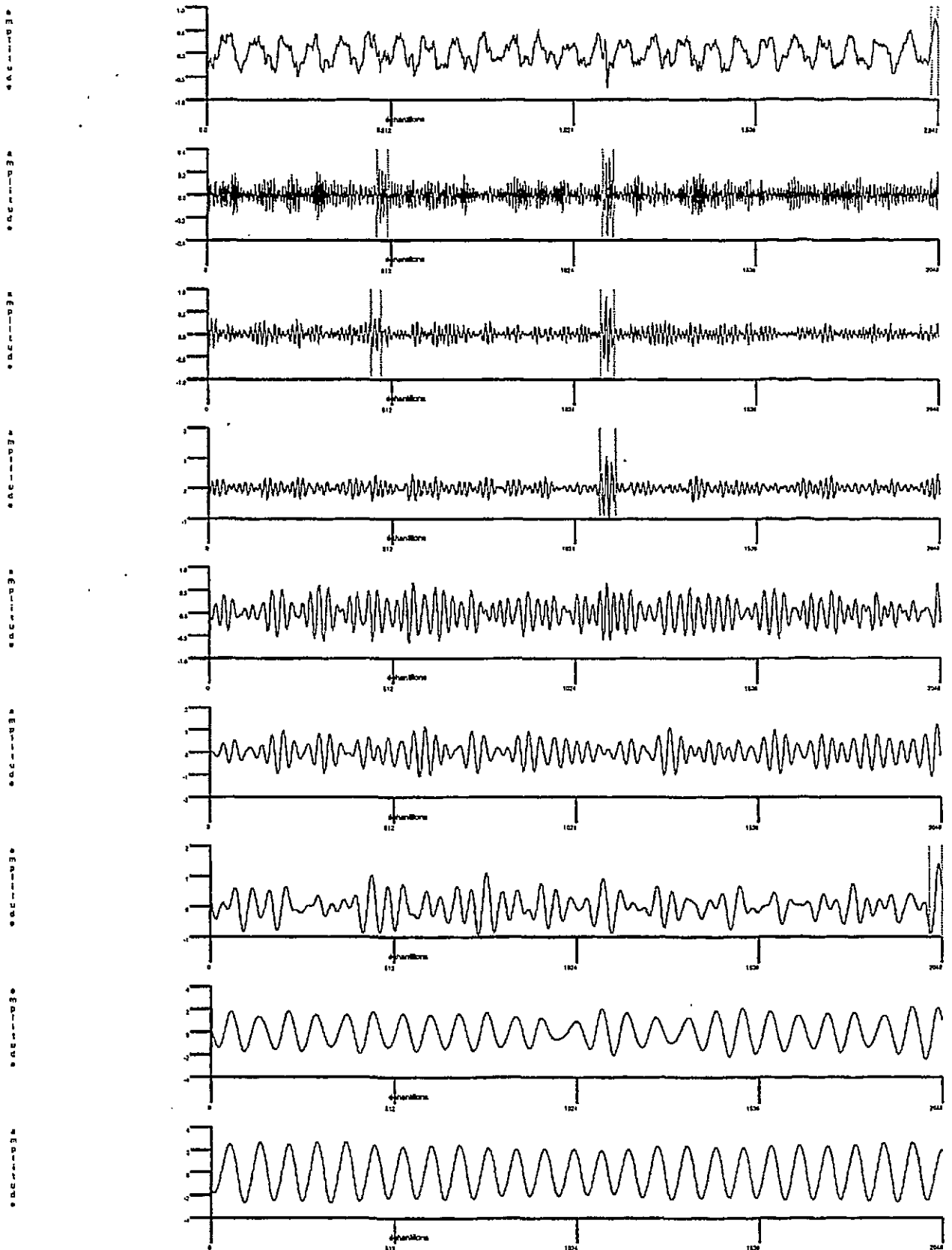


Figure 20 : Signal test (GI 12.6% + BF GV1)

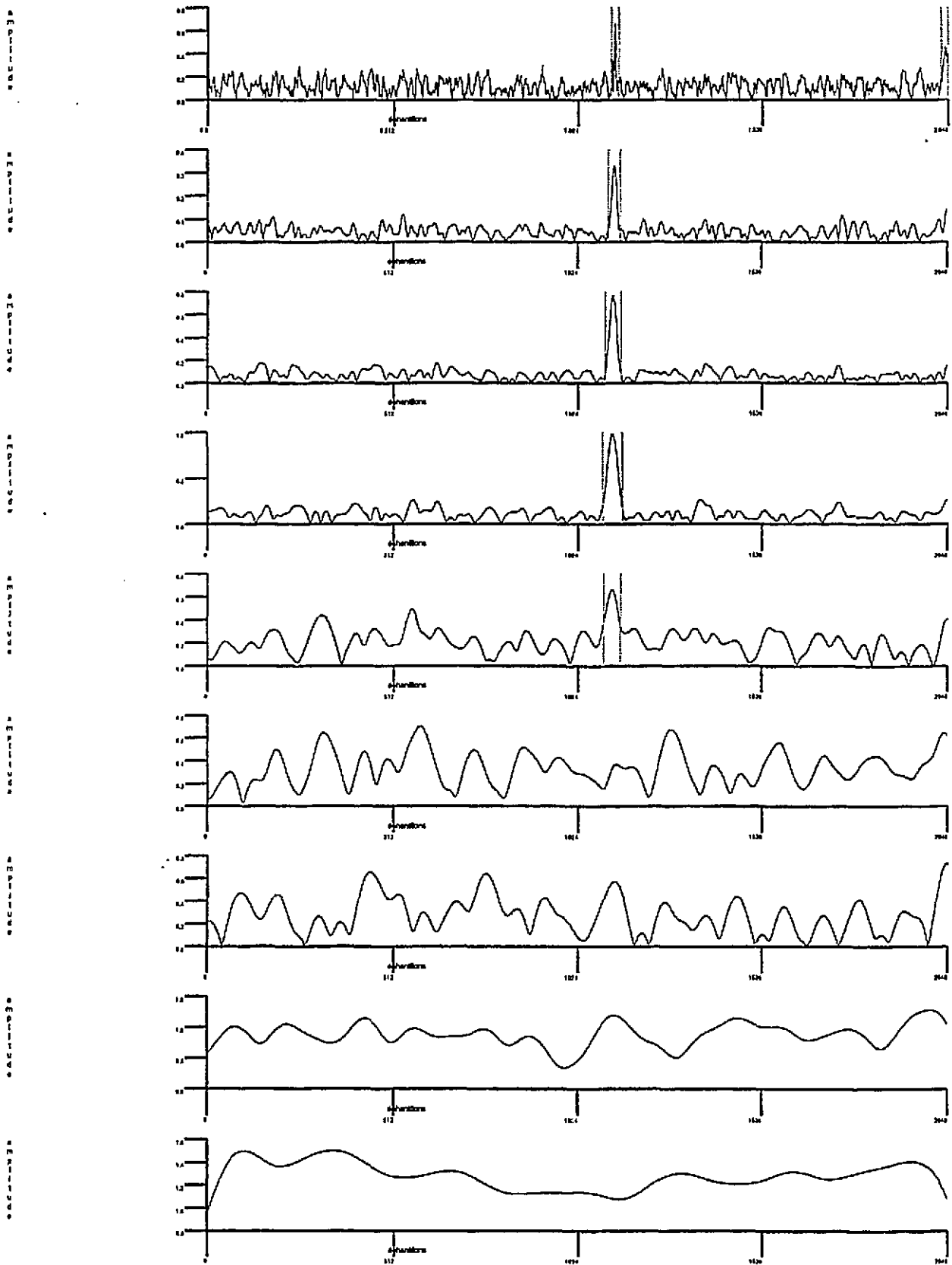
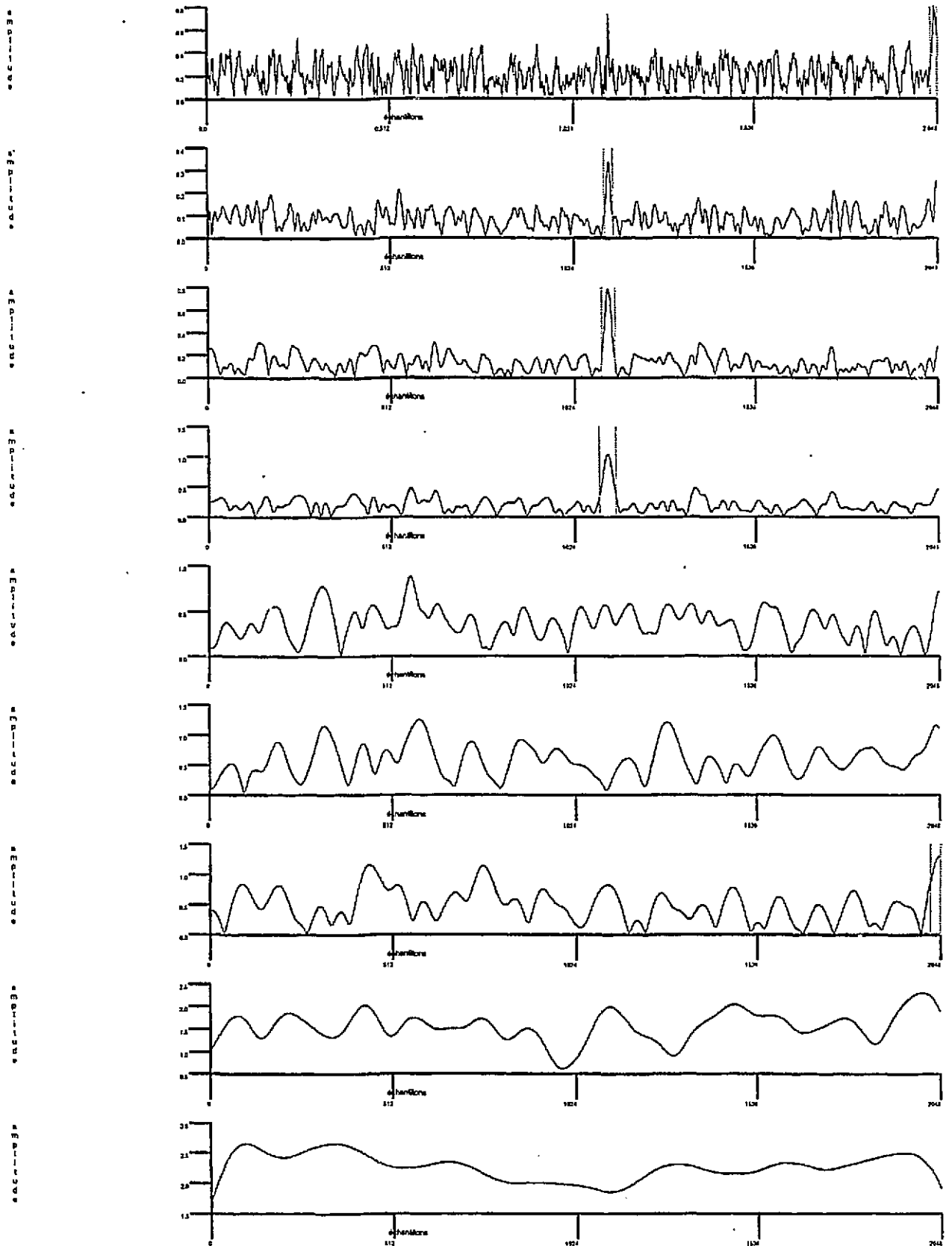


Figure 21 : Signal test (GI 12.6% + BF GV1)



2.4.2. Essai sur signaux réels

L'algorithme a été ensuite appliqué sur des signaux de contrôle de maquettes. Les maquettes utilisées sont des tronçons de tube en inconel 600, parfaitement connus, sur lesquels ont été usinées différentes usures (figure 22) :

- des usures (encoches) simples de profondeurs 10%, 20%, 30%, 40%, 60%, 80% et 100%,
- des usures (encoches) doubles en vis-à-vis de couple de profondeurs (20%, 20%), (20%, 40%), (20%, 60%), (40%, 40%) et (40%, 60%).

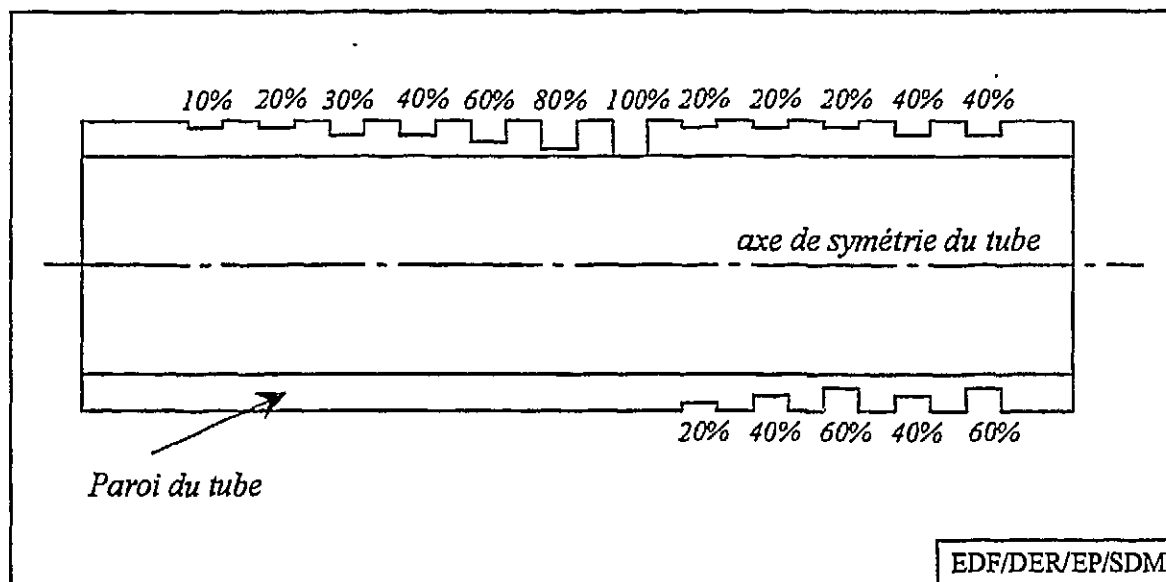


Figure 22 : Schéma des maquettes

La figure 23 présente l'application de l'algorithme de détection sur la portion du signal réel étudié comprenant les transitoires des usures simples de profondeurs 60% à 10%. La figure 24 fournit le résultat obtenu avec la version complexe de l'algorithme.

Dans les deux cas, l'algorithme étudié ne permet pas de déceler les usures simples de profondeurs 10%, 20%, 30% et 40%.

Néanmoins, des événements réels sont détectés sur certaines voies de la décomposition et même en coïncidence sur plusieurs voies (deux voies). La décomposition par ondelettes continues met clairement en évidence les usures réelles, difficilement décelables sur le signal initial (figures 23 ou 24).

Dans ce cas, la base de décomposition et la règle de décision ne semblent pas être optimales (les événements sont principalement détectés sur les octaves 3 et 4). Il serait probablement souhaitable de poursuivre l'étude sur une base de signaux plus importante et d'optimiser la base de décomposition et l'algorithme de détection.

Figure 23 : Signal de la maquette UV1ABF

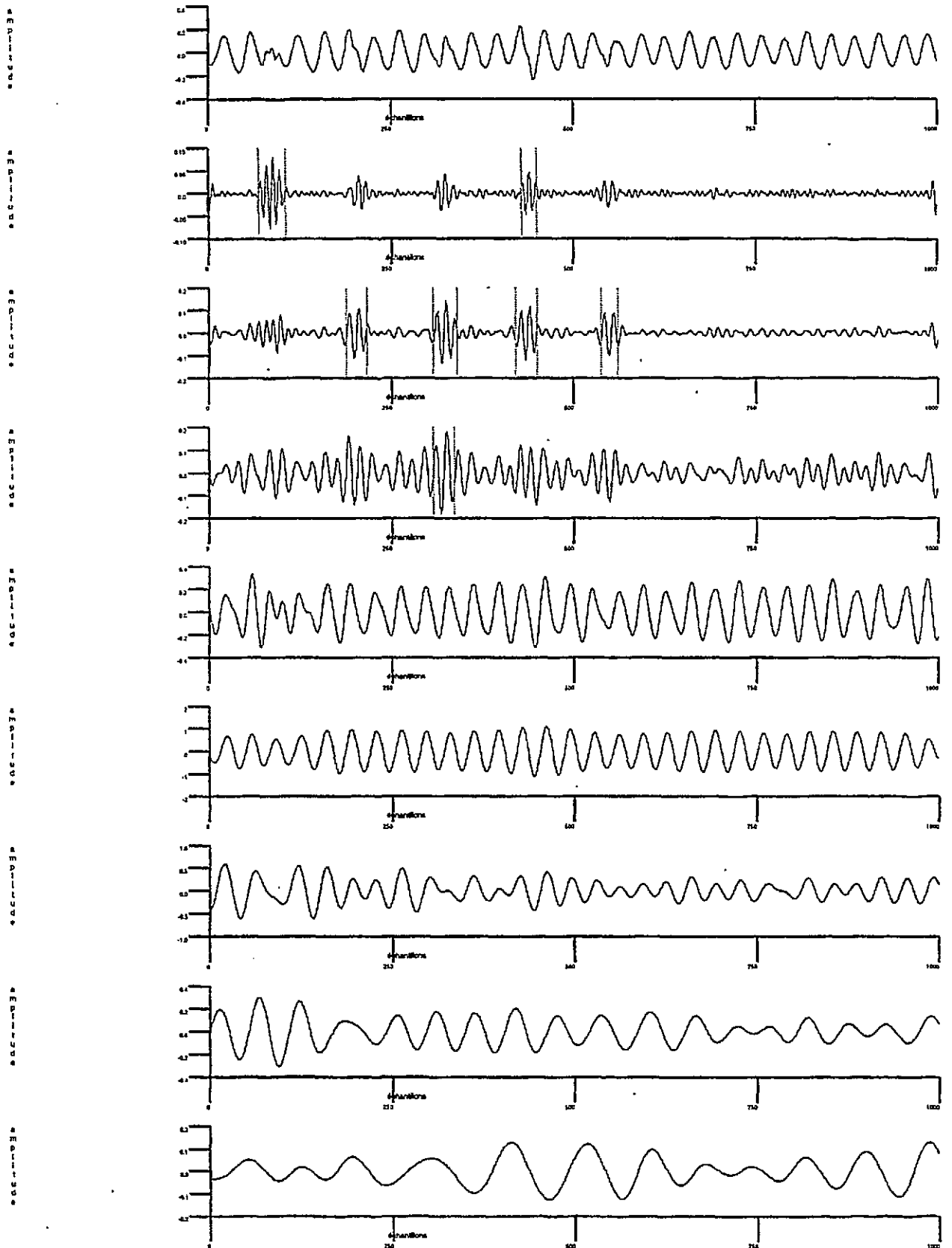
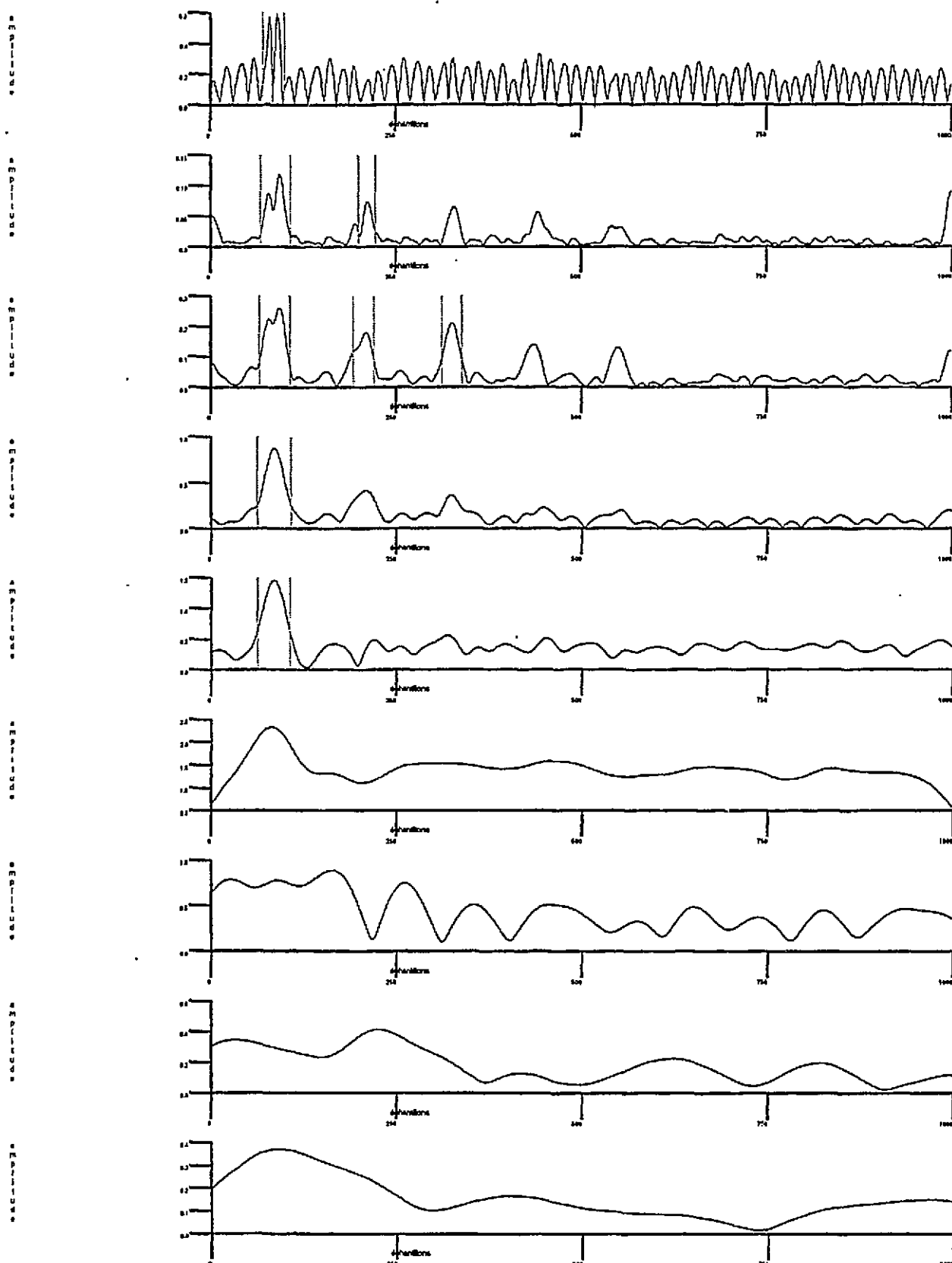


Figure 24 : Signal de la maquette UV1ABF



2.5. Synthèse

Contrairement à la conclusion tirée dans [SIM89], les ondelettes restent un outil intéressant pour l'analyse des signaux courants de Foucault. La décomposition d'un signal sur plusieurs octaves :

- permet d'étudier le signal sur plusieurs échelles (soit différentes bandes de fréquences),
- permet de mettre en œuvre une détection plus fine, qui peut s'adapter aux structures du signal et du bruit.

Par contre, l'algorithme de détection dans sa version présente ne permet pas de déceler tous les transitoires caractéristiques de défauts. En particulier, la règle de décision ne convient pas pour tous les transitoires utiles. De plus, l'algorithme ne met pas en évidence les événements de faible amplitude situés immédiatement après des événements de forte amplitude.

Pour améliorer la détection, il serait intéressant d'optimiser la base de décomposition et la règle de décision. Par ailleurs, l'utilisation itérative de l'algorithme sur des tronçons de signal débarrassés au fur et à mesure des transitoires de forte amplitude peut permettre de détecter les transitoires utiles quelle que soit leur amplitude.

Il serait bon aussi de confirmer ces premiers résultats sur d'autres signaux de synthèse et sur une grande quantité de signaux réels.

CONCLUSION

Comme nous l'avons rappelé en introduction, ces deux études entrent dans le cadre des travaux menés au sein du groupe Traitements Avancés de l'Information sur le non-stationnaire depuis 1989. Il nous semble dès lors intéressant, en guise de conclusion, de mettre à jour le tableau " signaux/méthodes " commencé dans [BRU92] et de donner une appréciation plus générale sur le non-stationnaire.

Le tableau permet de présenter, de façon formelle et synthétique, les méthodes non-stationnaires effectivement testées (références) ou pouvant s'avérer intéressantes (notes en italique) sur nos signaux ou images.

Il est complété, par rapport à sa version de 1992, par les études présentées dans le document présent avec les références [§1] et [§2]. Il est également enrichi des travaux menés par M. Johnson [JOH92] sur la compression par ondelettes d'images radiographiques, par G. Calot [CAL93] sur l'application de la corrélation spectrale pour le diagnostic de l'état d'engrenages et des travaux en cours de réalisation dans le cadre du CERD EP605 " Analyse temps-fréquence ou par ondelettes des signaux non-stationnaires " .

Les nouveaux résultats obtenus dans ces dernières études figurent dans les cases grisées.

Pour finir, nous concluons que les méthodes présentées dans ce rapport, et de manière plus générale les méthodes non-stationnaires, constituent des outils intéressants d'analyse des signaux et des images, qui complètent bien les méthodes classiques.

Certes elles ne permettent pas encore de résoudre toutes les difficultés non traitées par les méthodes classiques. Néanmoins, elles fournissent des solutions qui méritent d'être soulignées et donc étudiées plus avant.

Le gain de 5 dB apporté par l'algorithme de détection sur des signaux synthétiques est un résultat intéressant qui demande à être confirmé.

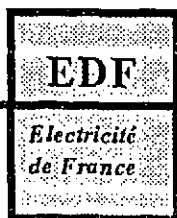
	SIGNAUX EDF	REPRESENTATIONS TF/TE DÉCOMPOSITIONS BILINÉAIRES	REPRESENTATIONS TF/TE DÉCOMPOSITIONS BILINÉAIRES	REPRESENTATIONS PARAMÉTRIQUES MODÉLISATION ARMA
TRANSITOIRE				
Aléatoire				
- gaussien dans bruit coloré gaussien de covariance inconnue				
- de spectre en f^γ	BN	[GAR90] <i>Discrimination par PWVL.</i>	[FLA90] [GAC91] [GAR90] <i>Analyse par TO.</i>	[GAR90]
Déterministe				
- parfaitement connu dans bruit composite connu (bbg+bcg+impulsions)				
- inconnu dans bruit coloré gaussien de covariance inconnue				
- connu dans bruit coloré gaussien de covariance inconnue				
- connu dans bruit coloré non-gaussien de covariance inconnue				
- de forme connue mais retard, amplitude et échelle inconnus, dans bruit	CDF (FD) MT	<i>Analyse par PWVL.</i>	[SIM89] <i>Filtrage pseudo-adapté version TO.</i> <i>Analyse phase TO*.</i> [S2] <i>Détection par TO*.</i>	[VIL87]
- de forme exponentielle décroissante	DCE	[CAI92] <i>Analyse par PWVL.</i> <i>Détection par degré d'instationnarité*.</i>	<i>Analyse par TO.</i>	
- somme de sinusoides amorties				
- large bande				
- à énergie finie				
SIGNAL EVOLUTIF				
- à spectre évolutif				
- modélisable AR				
- cyclo-stationnaire	ENG	[ZIV91] [CAI93]		
RUPTURE				
- changement spectral				
- changement additif	CDF (FA)			[S1]
IMAGE	CC RAD		[LAV91] <i>Analyse par ondelettes en quinconce.</i> [JOH92]	

Légende :

- CDF (FA) : courants de Foucault (fréquence absolue),
- CDF (FD) : courants de Foucault (fréquentielles différentielles),
- BN : bruit neutronique,
- DCE : signaux de corps errants,
- ENG : signaux d'engrenages,
- CC : images de crayons combustibles,
- MT : signaux de machines tournantes,
- RAD : radiographies,
- * : travaux en cours (Contrat 2K8312 - EP 605).

RÉFÉRENCES

- [BRU92] P. BRUNEL, P. PRIEUR, " Analyse des signaux non-stationnaires. Application à certains signaux EDF ", Rapport EDF HP-21/92-34.
- [CAL93] G. CALOT, " Application de la corrélation spectrale aux signaux d'engrenages ", Rapport EDF HP-21/93/039.
- [CAI92] M. CAI, C. VINCENT, " Débruitage par soustraction spectrale pour la détection des corps errants ", Journées d'études du GAMI, Progrès récents des méthodes de surveillance acoustiques et vibratoires, Senlis, 1992.
- [CLO92] C. CLOAREC, " Étude expérimentale de l'additivité des signaux courants de Foucault ", Rapport EDF HP-21/92-13.
- [FLA90] P. FLANDRIN, O. RIOUL, " Affine Smoothing of the Wigner-Ville Distribution ", ICASSP-90, Albuquerque, pp. 2455-2458.
- [GAC91] N. GACHE, P. FLANDRIN, D. GARREAU, " Fractal Dimension Estimators for Fractional Brownian Motions", ICASSP-91, Toronto, pp. 3557-3560.
- [GAR90] D. GARREAU, " Intérêts des Ondelettes en Surveillance et Diagnostic ", Rapport EDF HP-21/90-21.
- [JOH92] M. JOHNSON, " Image compression : wavelets and quantization ", Rapport EDF HP-21/92-63.
- [LAV91] B. LAVAYSSIERE, " Intérêt des ondelettes en traitement d'images ", Rapport EDF HP-21/91-45.
- [POU87] Y. POUPEAU, " Amélioration du rapport signal sur bruit des signaux de contrôle par courants de Foucault (thèse de doctorat de l'université P. ET M. Curie) ", Rapport EDF HP-21/89-25.
- [SIM89] P. SIMARD, N. COLIN, M. BULO, " Caractérisation de signaux de contrôle non destructif par l'analyse multi-échelles ", Douzième Colloque GRETSI, Juan-les-Pins, 1989, pp. 743-746.
- [VIL87] C. VILLEMUR, " Étude théorique et réalisation de logiciels de reconnaissance de défauts de tubes de générateurs de vapeur par courants de Foucault ", Rapports GAPSE No. 6 et No. 7, Contrat EDF No. 2F4109 - EP 205.
- [ZIV91] G. D. ZIVANOVIC, W. A. GARDNER, " Degrees of cyclostationarity and their application to signal detection and estimation ", Signal Processing, mars 1991, Vol. 22, No. 3, pp. 287-297.



*Direction des Etudes
et Recherches*

*Service Information
Prospective et Normalisation*

CLAMART

Le 02/06/95

*Département Systèmes d'information
et de documentation*

*Groupe Exploitation
de la Documentation Automatisée*

1, avenue du Gal de Gaulle
92141 CLAMART Cedex
tel: 47 65 56 33

CEA

MIST/SBDS/SPRI
CENTRE DE SACLAY

91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

à l'attention de :

MEMOIRE TECHNIQUE ELECTRONIQUE

CETTE FEUILLE EST DETACHABLE GRACE A LA MICROPERFORATION SUR LE COTE DROIT.

Référence de la demande : **F528220**
Origine : **CATALOGUE DES NOTES DER**

Votre commande :

Numéro du document : **94NB00127**

Titre : **INTERET DE L'APPROCHE NON-STATIONNAIRE : ESSAI SUR SIGNAUX COURANTS DE FOUCAULT**

Auteurs : **BRUNEL P.**

Source : **COLL. NOTES INTERNES DER. PRODUCTION D'ENERGIE (HYDRAULIQUE, THE**
Serial :

Référence du document : **SANS**

Nombre de pages: **0044**

Nombre d'exemplaires : **001**

Support : **P**