

DETECTION DE FUTES PAR EMISSION ACOUSTIQUE

Pascal BOULANGER^(1,2), Patrick DUVAUT⁽²⁾.

(1) : C.E.A./DER/SCC/LECC - 13108 Saint Paul lez Durance
 (2) : ENSEA/ETIS - Impasse des chênes pourpres, 95000 Cergy

RESUME

La détection des fuites susceptibles d'apparaître dans les réseaux de tuyauteries des centrales à eau pressurisée est un problème crucial pour la sûreté de fonctionnement. La technique actuelle réside dans un suivi continu de la valeur efficace du signal acoustique transporté le long de la tuyauterie sous forme d'ondes élastiques de surface. L'objet de cet article est de présenter les résultats de détecteurs plus évolués, issus de méthodes classiques et modernes du traitement du signal et fondés sur une meilleure interprétation des informations a priori, dans le but d'améliorer les performances de la détection et d'initier une étape de caractérisation des signaux de fuites.

ABSTRACT

Leak detection in pressurized water reactor primary or secondary coolant system is crucial for working safety. The existing methods lies on a real time mesuring of the Root Mean Square value of elastic waves shaped signals across the piping network. This article deals with the presentation of the results obtained for sophisticated detectors, grounding on classical and modern signal processing technics and taking into account a better part of the a priori knowledge concerning the physical phenomenon generating acoustic emission. We aim to improve the performances of the detection and initiate a future step of leak acoustic signals caracterisation.

1. INTRODUCTION

La surveillance en temps réel des réseaux de tuyauteries des centrales nucléaires [1][2] ou l'inspection saisonnière de l'étanchéité d'un générateur de vapeur ou de la cuve du réacteur à l'arrêt [3], s'oriente vers l'intégration de systèmes de traitements numériques, permettant d'améliorer les performances des systèmes analogiques actuels. A ce titre, la démarche et les techniques de traitement du signal peuvent constituer un axe de recherche prometteur. Nous présentons en première partie le principe de l'émission acoustique (EA) [4] dans le cas des signaux de fuites, exposons le schéma du banc de mesure qui nous a conduit à proposer un modèle de fuite empirique et d'avancer certaines d'information a priori (IAP). La seconde partie est dévolue au rappel de la problématique de détection et à la présentation des différentes méthodes induites par une démarche empirique. La validation de ces détecteurs procède d'une double approche à l'aide des courbes COR, asymptotiques et empiriques modifiées, que nous détaillons en dernière partie.

2. L'EMISSION ACOUSTIQUE

D'après la définition normalisée AFNOR NFA-350, l'EA désigne "un phénomène de création d'ondes élastiques transitoires résultant de micro déplacement locaux internes à un matériau". Dans le cas de la détection de fuites, la source sonore n'est pas de nature mécanique mais hydroacoustique, les ondes se propageant sous la forme d'ondes élastiques de surface le long de la structure [5], mesurées par l'intermédiaire de capteurs piézo-électriques.

La description d'un écoulement double phase le long d'une fissure peut engendrer un phénomène de débit critique lorsque la somme des pertes de charges à l'intérieur de la fissure (entrée, accélération, frottement et variation de section)

n'équilibre plus la différence de pression totale entre l'entrée et la sortie de la fissure [6]. Pour un régime d'écoulement sous critique, on adoptera la description classique d'un écoulement double phase, tandis que le régime critique sera modélisé à l'aide du modèle de Battelle-Henry, présentés en figure 1.

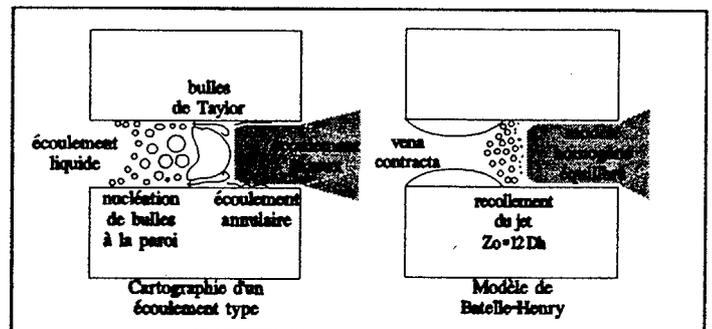


figure 1 : modèles de fuites

La modélisation des bruits d'écoulement fait référence à la théorie de l'hydroacoustique de Lighthill [7] et permet d'avancer une relation phénoménologique simple entre la puissance acoustique et le débit massique d'écoulement. Dans une première approximation on supposera que seules interviennent les sources acoustiques monopolaires, décrivant l'ensemble des phénomènes dus à l'existence de bulles de vapeur. Dans le cas du régime sous critique, l'EA est due à l'augmentation du débit, de l'aire de brèche en fonction du moment de flexion et du coefficient de frottement, impliquant une dépendance en :

$$P_{EA} \propto Q^2 \quad (2.1)$$

Dans le cas du régime critique, l'EA ne dépend presque plus que de l'aire de brèche et conduit à :

$$P_{EA} \propto \sqrt{Q} \quad (2.2)$$



L'emploi de ce double modèle coïncide de façon convenable avec l'expérience et permet d'avancer un profil spectral des signaux au voisinage de la source, figure 2.

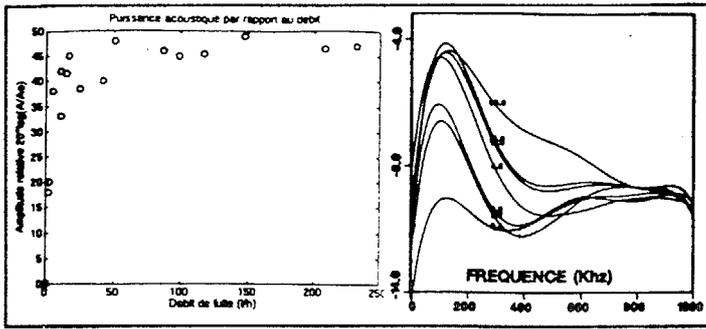


figure 2 : EA en fonction du débit de fuite et spectre

L'étude de la propagation des signaux ultrasonores sur une coque métallique, cylindrique, mince, remplie d'eau sous pression, induit nombre de phénomènes perturbateurs [4][5] :

- ondes de surface de Lamb dispersives,
- atténuation et propagation couplée fluide-structure,
- propagation hélicoïdale à chemins multiples,
- influence du Rapport Signal sur Bruit (RSB).

Les premières références de détection de fuites par EA datent de la fin des années soixante dix, la seule méthode utilisée en détection consiste en un suivi en temps réel de la valeur efficace des signaux mesurés, la décision proprement dite intervenant par comparaison avec un seuil fixé arbitrairement en fonction du bruit de fond [1]. La plupart des études de caractérisation des signaux mettent en avant une dépendance linéaire entre l' EA et le logarithme du débit de fuite [3] ainsi qu'une fenêtre de détection optimale en fonction du RSB, l'ensemble des résultats obtenus semblant très lié à la configuration des sections d'essais [2]. L'interprétation de nos résultats permet d'avancer quelques caractéristiques que l'on peut interpréter sous forme d' IAP pour le signal de fuite :

- stationnarité des signaux,
- Profil spectral et fréquence centrale,
- présence d'échos multiples,
- influence du bruit de fond,
- gaussianité du bruit de fond.

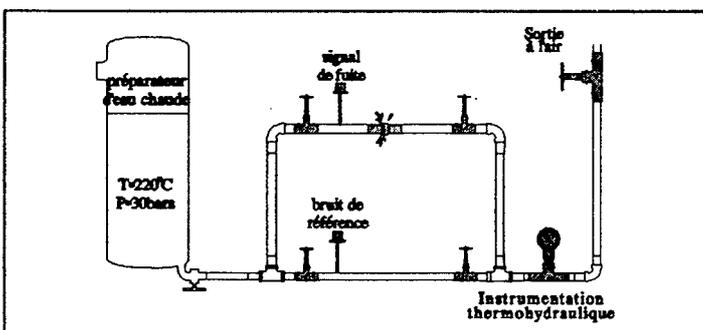


figure 3 : Section d'essais

Dans le but de tester les performances des méthodes proposées, nous avons conçu un banc de mesure permettant de générer un signal de fuite et un bruit de fond synchrones, dans des conditions proches de la réalité des conditions du circuit secondaire (eau saturée : T=234°C, eau sous saturé : T=220°C, P=30 b). Le banc est instrumenté avec des capteurs de température, de pression et de débit, ainsi que des capteurs piézo-électriques large bande (EPA WD), montés sur guides d'ondes pour assurer leur isolation thermique, figure 3.

3. DETECTEURS

La problématique de la détection s'interprète classiquement sous la forme d'un test d'hypothèse [8][9][10] dont le cahier des charges interdit l'accès à l'instant de l'apparition du défaut. Le principe des détecteurs proposés dans cette article repose sur une transformation $T[\cdot]$ de l'espace des observations, dont on néglige les termes croisés $T[s(t).b(t)]$ et qui permet d'unifier la problématique :

$$\begin{cases} H_0 & \underline{I} = T[b] \\ H_1 & \underline{I} = T[s] + T[b] \end{cases} \quad (3.1)$$

L'approche du problème de la détection selon le critère de Neymann-Pearson conduit, à partir de la données des densités de probabilité conjointes des observations, à étudier la statistique du *Rapport de Vraisemblance* (RVS) selon les deux hypothèses H_0 et H_1 de façon à déterminer l'hypothèse la plus vraisemblable par comparaison à un seuil Λ_0 [8]. On définit alors deux grandeurs caractéristiques, la *probabilité de fausse alarme*, P_{fa} , et la *probabilité de détection correcte*, P_{dc} . L'élimination du seuil dans les expressions analytiques de la P_{fa} et de la P_{dc} conduit à une famille de courbes de *Caractéristiques Opérationnelles de Détection* (COR) [8] ou courbes *COR Asymptotiques* (CORA) par application du *Théorème de la Limite Centrale* (TLC). Dans un contexte applicatif, cette démarche statistique permet de s'affranchir de la référence bruit de fond, la démarche déterministe s'en déduisant en donnant au seuil, une valeur dépendant du résultat du test effectué sur une ou plusieurs réalisations du bruit de fond.

Ces détecteurs sont regroupés en trois familles distinctes selon la quantité d' IAP prise en compte. La première famille rassemble les méthodes de détection énergétique. La seconde famille fait référence à une interprétation des IAP sous forme d'une modélisation paramétrique, la dernière famille propose une méthode originale de détection fondée sur l'utilisation des grandeurs d'ordre supérieur.

3.1. DETECTEURS ENERGETIQUES

Détecteur quadratique

Le détecteur classique est fondée sur l'utilisation du carré de la valeur efficace des observations. Il est optimal pour la détection d'un bruit gaussien noyé centré dans un bruit gaussien centré [8] et l'équation des courbes COR est donnée, pour la détection d'un signal idéal ($s(t) = 1$), par :

$$\begin{cases} P_{fa} = \text{erfc} \left(\frac{\sigma}{\sqrt{N}} \Lambda' + \frac{\sqrt{N}}{2\sigma} \right) \\ P_{dc} = \text{erfc} \left(\frac{\sigma}{\sqrt{N}} \Lambda' - \frac{\sqrt{N}}{2\sigma} \right) \end{cases} \quad (3.2)$$

Dans la réalité, ce détecteur n'intègre pas d' IAP structurelles des signaux et présente une forte limitation due au RSB.

Détecteur linéaire d'enveloppe

L'enveloppe d'un processus modulé est obtenue par élimination de la fréquence porteuse, un détecteur linéaire d'enveloppe est défini par :

$$r(t) = a(t) \cos(\omega t + \psi) \Rightarrow T[r] = Ka(t) \quad (3.3)$$

La transformée de Hilbert permet d'obtenir une estimation de l'enveloppe d'un signal réel. Si l'on suppose que les signaux sont à bande étroite, les lois de probabilités de l'enveloppe d'un bruit ou d'un signal dans un bruit sont des lois de Rayleigh [9][11]. L'équation des courbes CORA distingue les faibles RSB :

$$\begin{cases} P_{fa} = \text{erfc} \left(\frac{4\sigma^2}{N} \Lambda' + \frac{N}{4\sigma^2} \right) \\ P_{dc} = \text{erfc} \left(\frac{4\sigma^2}{N} \Lambda' - \frac{N}{4\sigma^2} \right) \end{cases} \quad (3.4)$$

et les forts RSB :

$$\begin{cases} P_{fa} = \text{erfc} \left(\frac{\sigma}{\sqrt{2N}} \Lambda' + \frac{\sqrt{N}}{2\sigma\sqrt{2}} \right) \\ P_{dc} = \text{erfc} \left(\frac{\sigma}{\sqrt{N}} \Lambda' - \frac{\sqrt{N}}{2\sigma} \right) \end{cases} \quad (3.5)$$

Une interprétation bande étroite des signaux est erronée en pratique, mais constitue déjà la prise en compte en première approximation du caractère modal des signaux de fuites [9][11].

Détecteur en banc de filtres

Une façon de tenir compte de l'aspect spectral du signal de fuite et d'éliminer une partie du bruit de fond consiste à décomposer les signaux dans l'espace spectral à l'aide de l'utilisation de banc de filtres. Plusieurs familles de filtres peuvent être proposés (Transformée de Fourier Discrète (TFD), filtres numériques en parallèle, filtres miroirs en quadrature [12] ou méthode "SSP" [13]. Le filtrage étant linéaire, l'équation des courbes CORA pour un banc de filtre déterminé par une famille de N filtres de RI $h_i(n)$, de transmittance t_i et de norme Δ_i est donnée par :

$$\begin{cases} P_{fa} = \text{erfc} \left(\frac{\Lambda'}{\sqrt{\sum (t_i \Delta_i)^2}} + \frac{\sum (t_i / \Delta_i)^2}{2\sqrt{\sum (t_i \Delta_i)^2}} \right) \\ P_{dc} = \text{erfc} \left(\frac{\Lambda'}{\sqrt{\sum (t_i \Delta_i)^2}} - \frac{\sum (t_i / \Delta_i)^2}{2\sqrt{\sum (t_i \Delta_i)^2}} \right) \end{cases} \quad (3.6)$$

A partir des critères relatifs à chaque bandes de fréquences, on détermine un critère global par fusion de données.

3.2. DETECTEURS PARAMETRIQUES

L'introduction de détecteurs paramétriques est fondée sur l'idée que, selon le théorème de décomposition de Wold, le signal est décomposé comme la somme d'une partie purement déterministe et d'une partie purement aléatoire. Nous présenterons deux exemples de méthodes paramétriques.

Détecteur de variance de prédiction linéaire

L'idée d'un tel détecteur réside dans l'hypothèse que le signal de fuite est plus prédictible que le bruit de fond, la variance du prédicteur devant présenter un comportement différent [14] :

$$T[r] = e(t/t-1) = r(t) - \frac{\Delta^T}{h} \cdot r(t-1) \quad (3.7)$$

En pratique, on adopte une résolution adaptative de la prédiction en intégrant la transmittance t du filtre optimal et la variance d'estimation Δ^2 de l'algorithme du gradient [8] dans le calcul des courbes CORA :

$$\begin{cases} P_{fa} = \text{erfc} \left(\frac{\Delta}{(1-t)\sqrt{N}} \Lambda' + \frac{(1-t)\sqrt{N}}{2\Delta} \right) \\ P_{dc} = \text{erfc} \left(\frac{\Delta}{(1-t)\sqrt{N}} \Lambda' - \frac{(1-t)\sqrt{N}}{2\Delta} \right) \end{cases} \quad (3.8)$$

Ce détecteur peut être proposé pour la segmentation de signaux si on a accès à l'instant de rupture du modèle [15].

Détecteur par autocorrélation

De façon plus générale, la modélisation paramétrique linéaire d'un p.a. peut s'exprimer comme une forme particulière de la fonction d'autocorrélation. En calculant les N premiers termes de l'estimateur non biaisé de l'autocorrélation sur un horizon de taille P, on en déduit les courbes CORA :

$$\begin{cases} P_{fa} = \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{2\sigma}{N(2P-N+1)}} \Lambda' + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{N(2P-N+1)}{2\sigma}} \right) \\ P_{dc} = \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{2\sigma}{N(2P-N+1)}} \Lambda' - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{N(2P-N+1)}{2\sigma}} \right) \end{cases} \quad (3.9)$$

La propriété intrinsèque d'élimination du bruit rend ce détecteur attractif et lui confère de bonnes performances asymptotiques. Mais il semble qu'une prise en compte plus détaillée des densités de probabilité des échantillons de l'autocorrélation, soit plus représentative du comportement réel du détecteur.

3.3. DETECTEUR D'ORDRE SUPERIEUR

L'avènement des méthodes d'ordre supérieur en traitement du signal [8] et les propriétés qu'elles présentent [16], les rendent attrayantes dans le contexte de la détection de fuites par EA. Elles permettent d'éliminer le bruit parasite et constituent un pas supplémentaire dans l'utilisation d'IAP nouvelles, interprétées sous forme de moments statistiques d'ordre supérieur.

Détecteur d'ordre supérieur

Nous présentons une méthode fondée sur l'utilisation des cumulants d'ordre quatre, fondée sur une analyse comparée du Skew et du Kurtosis.

$$T[r] = \frac{1}{(N - \sup(k_j))} \sum_{i=\sup(k_j)}^{i=N-1} r(i)r(i-k_1)r(i-k_2)r(i-k_3) - \{\hat{\gamma}(k_1)\hat{\gamma}(k_3-k_2) + \hat{\gamma}(k_2)\hat{\gamma}(k_3-k_1) + \hat{\gamma}(k_3)\hat{\gamma}(k_2-k_1)\} \quad (3.10)$$

L'approche du maximum de vraisemblance conduit à un test statistique sur une forme quadratique de T sur l'ensemble des triplets (k_1, k_2, k_3) de l'espace de représentation de taille P. Le calcul des courbes CORA est analogue à celui développé dans [17] et fait référence à une statistique de Hotelling T_0^2 décentrée de paramètre de décentrage $\lambda(P, N)$ égal à la vraie valeur recherchée :



$$\begin{cases} P_{fa} = \operatorname{erfc} \left(\frac{\Lambda' - 2(P-1)}{\sqrt{4(P-1)}} \right) \\ P_{dc} = \operatorname{erfc} \left(\frac{\Lambda' - 2(P + \lambda(P, N) - 1)}{\sqrt{4(P + 2\lambda(P, N) - 1)}} \right) \end{cases} \quad (3.11)$$

4. PERFORMANCES DES DETECTEURS

Nous avons adopté au cours des parties 2 et 3 une démarche déductive de calcul des performances des détecteurs par les courbes CORA qui sont rassemblées sur la figure 4.

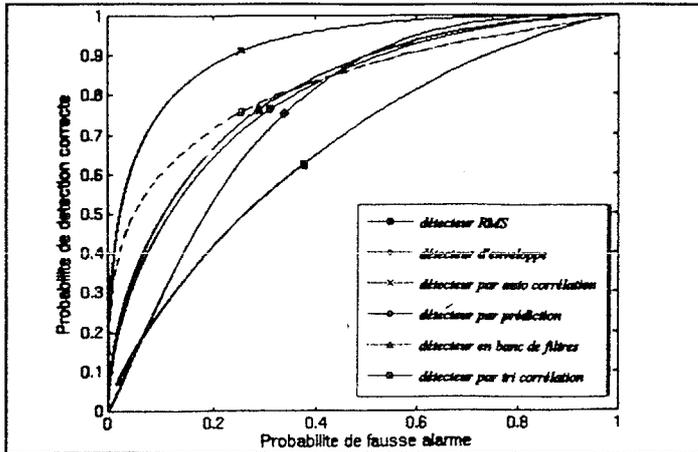


figure 4 : Exemple de courbes CORA des détecteurs

La conception de la section d'essai nous permet de définir des quantités empiriques analogues à la P_{fa} et à la P_{dc} . On introduit le *taux de fausse alarme*, τ_{fa} , comme étant le rapport appliqué au bruit de fond :

$$\tau_{fa} = \frac{\operatorname{Card}\{r = b, \Lambda(r) > \Lambda_0\}}{N} \quad (4.1)$$

et le *taux de détection correcte*, τ_{dc} , comme étant le même rapport appliqué au signal de fuite :

$$\tau_{dc} = \frac{\operatorname{Card}\{r = s + b, \Lambda(r) > \Lambda_0\}}{N} \quad (4.2)$$

Par élimination du seuil, on construit un ensemble de courbes COR *Empiriques*, car issues de la mesure, *Modifiées* [10], car faisant appel à des taux et non des probabilités (COREM). Pour chaque détecteurs on a ainsi une estimation des performances réelles sur un signal de fuite de débit 17 l/h, ce qui correspond à un faible RSB, à l'aide des courbes COREM de la figure 5.

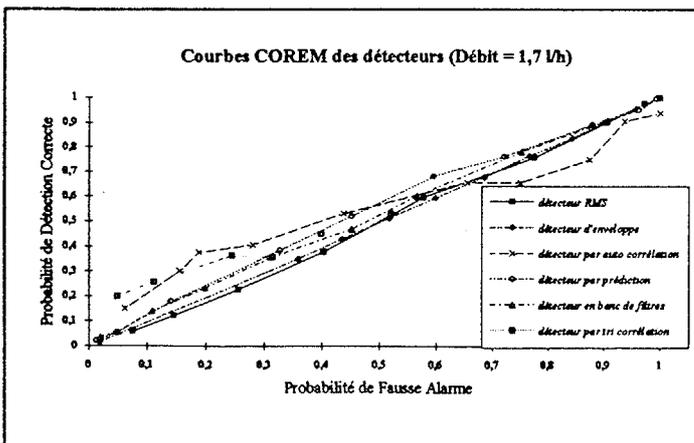


figure 5 : Exemples de courbes COREM des détecteurs

D'un point de vue amont, au regard des courbes CORA, on peut avancer un premier classement des détecteurs mettant en évidence la corrélation entre la qualité de l'estimation des IAP et l'amélioration des performances. Les méthodes les plus simples, valeur RMS, enveloppe présentent des performances limitées par le RSB. Viennent ensuite des méthodes plus perçantes telles que la prédiction linéaire, la décomposition en banc de filtres et l'autocorrélation qui s'affranchissent d'une partie du bruit perturbateur et intègrent les caractéristiques modales des signaux de fuites.

D'un point de vue aval, l'ensemble de ces résultats est confirmé par l'analyse des courbes COREM. Les deux détecteurs d'autocorrélation, d'ordre deux et d'ordre quatre, démontrent de réelles améliorations pour les faibles probabilités des courbes COREM, leurs courbes CORA ne reproduisant pas ce comportement. Tous les détecteurs présentés ici exhibent de meilleures performances que la méthode de la valeur RMS.

5. CONCLUSION

Les méthodes présentées dans cette article, illustrent le lien intime qui existe entre les performances d'un détecteurs et la quantité d'IAP prises en compte. L'étude des performances à l'aide d'une approche mixte, théorique avec les courbes CORA et empiriques avec les courbes COREM, permet de dépasser les critères objectifs de performances et donnent une idée des potentialités des détecteurs en environnement industriel. La démarche suivie dans cette étude peut être généralisée à un traitement de signaux multidimensionnels issus d'un réseau de capteurs et permettre d'initier une approche de caractérisation des signaux de fuites par l'utilisation d'antennes ou de réseaux de neurones.

6. REFERENCES

- [1] T.S.CLAYTON, V.KUPPERMANN, "Application of acoustic leak detection technology for the detection and location of leaks in light water reactors", NUREG-CR 5134, Argonne Nat. Lab 1985
- [2] G.BARTHOLOME, R.W.BIESELT, "The application of leak before break concept on nuclear piping of KWU plants", Report KWU. LAEA. Madrid 1985
- [3] P.DUMOUSSEAU, J.ROGET, "Application de l'émission acoustique à la caractérisation de fuites et au contrôle d'étanchéité", CETIM info n°72
- [4] I.A.VIKTOROV, "Rayleigh and Lamb waves", Plenum Press NY 1967
- [5] J. ROGET, "Essais non destructifs, l'émission acoustique", AFNOR CETIM 1988
- [6] R.E.HENRY, "The two phase critical discharge of initially saturated or subcooled liquids", Nucl.sc & eng., 41, pp 336-342, 1970
- [7] M.J.LIGHTHILL, "On sound generated aerodynamically", I. Gen. Theory, Proc. Roy. Soc., London 211A, pp 564-587, 1952
- [8] P.DUVAUT, "Traitement du signal, concepts et applications", Hermes 1991
- [9] D. MIDDLETON, "Introduction to statistical communication theory", Mac Graw Hill, 1960.
- [10] P.Y. ARQUES, G. FAUCON, B. JOSSE, "Comparaison des performances de certains systèmes de détection par courbes COR modifiées", Revue du Cethedec, 1975.
- [11] B. LEVINE, "Fondements de la radiotechnique statistique", Editions de Moscou, 1971
- [12] R.E. CROCHIERE, L.R. RABINER, "Multirate digital signal processing", Prentice Hall, 1983
- [13] V.L.NEWHOUSE, GuoYao YU, Yue LI, "A split Spectrum Processing method of scatterer density estimation", in Sig. Proc. & Pattern recog. in NDT, NATO ASI Series vol 44, SRINGER VERLAG, 1987
- [14] J.MAKHOUL, "Linear prediction ; a tutorial review", Proc of the IEEE, Vol 63, n°4, Apr 1975
- [15] E. DAYMIER, F. CASTANIE, "Analyse d'une méthode de détection de sauts de moyenne de variance", 10-ième colloque GRETSI, pp 131-136, Nice, 1985
- [16] D.R.BRILLINGER, "Introduction to polyspectra", Ann. Math. Stat. Vol. 36, pp 1351-1374, Oct 1965
- [17] D. KLETTER, H. MESSER, "Sub optimal detection of non gaussian signals by third order spectral analysis", IEEE trans. on ASSP, vol 38, n°6, pp 901-909, June 1990