

# DIXIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 20 au 24 MAI 1985

## OPTIMISATION D'UNE MESURE DE L'ENCRASSEMENT D'UN ECHANGEUR PAR DETECTION DE RUPTURES DANS UN MODELE

O. De CAMBRY et J. LABEYRIE

IFREMER, Centre de BREST - BP 337 - 29273 BREST CEDEX (France)

### RESUME

Le programme français CETO\* sur la construction d'un prototype de production à terre de l'énergie thermique des mers d'une puissance de 5 MeW prévoit de nombreux développements technologiques. En particulier, on doit pouvoir contrôler, d'une part la tenue des matériaux à la corrosion et aux salissures, et d'autre part, la stabilité des performances thermiques de ces échangeurs.

Le coefficient d'échange thermique est considéré comme un paramètre exhaustif mesurant l'efficacité d'un tel échangeur. A partir d'une analyse mathématique du problème de refroidissement d'un tube instrumenté, on définit un paramètre invariant appelé constante temps qui est relié au coefficient cherché par une équation de transcendance. En effet, le champ de température  $T(r,t)$  vérifie l'équation parabolique à une dimension dans un milieu homogène isotrope en régime de conduction transitoire et satisfait des conditions initiales et des conditions aux limites pour un échange de type convectif aux parois et pour la continuité du flux de chaleur.

Une procédure de sélection automatique d'une fenêtre temporelle  $[U_1, U_2]$  pour l'ajustement de la courbe de refroidissement a été réalisée à partir d'un algorithme séquentiel de la forme

$$Z_0 = 0, Z_{n+1} = (Z_n + \Psi(X_{n+1}))^+, \text{ IF } Z_n \geq S \text{ .stop}$$

où  $\Psi$  (fonction numérique) et  $S$  (valeur seuil) sont optimisés de façon à minimiser le retard à la détection pour un niveau de probabilité de fausse alarme donné. Cette probabilité s'introduit formellement par des théorèmes sur les grandes déviations.

La borne  $U_1$  est un instant de changement de moyenne dans un modèle exponentiel. La borne  $U_2$  résulte d'un changement de variance dans le bruit de mesure modélisable par une variable aléatoire gaussienne.

L'analyse informationnelle du signal a donc conduit à l'écriture d'un logiciel de calcul qui utilise en particulier les techniques de "réactualisation" pour évaluer des grandeurs statistiques.

### SUMMARY

For the French program OTEC\*, studies are carried on to qualify the material behaviours and cleaning methods of heat exchanger tubes. In particular, we have to control the thermo-insulating deposit (biological slime, corrosion products,...) which can reduce drastically heat transfer exchanges.

The heat transfer coefficient between pipe and water may be considered as an exhaustive parameter to quantify the efficiency of an exchanger tube. A mathematical analysis of the tube cooling problem leads to define an invariant parameter named the time constant which is connected with the heat transfer coefficient by a transcendental equation. In fact, the temperature field  $T(r,t)$  verifies the governing parabolic equation for one dimensional transient conduction in a homogeneous isotropic medium, and satisfies initial and boundary conditions.

An automatic selection of a time window  $[U_1, U_2]$  for fitting the curve cooling has been realized from a sequential algorithm in the form,

$$Z_0 = 0, Z_{n+1} = (Z_n + \Psi(X_{n+1}))^+, \text{ IF } Z_n \geq S \text{ Stop}$$

where  $\Psi$  (numerical function) and  $S$  (threshold value) are computed to minimize the detection delay for a given false alarm probability level. This probability may be introduced formally from large deviation theory.

The bound value  $U_1$  is identified as the mean change time in an exponential model. The bound value  $U_2$  is the variance change time in the measure  $Z$  noise randomized by a normal variable.

The signal analysis leads to define a computational software which uses adapting formulae to compute the statistics.

\* Conversion de l'Energie Thermique des Mers

\* Ocean Thermal Energy Conversion



OPTIMISATION D'UNE MESURE DE L'ENCRASSEMENT D'UN ECHANGEUR PAR DETECTION DE RUPTURES DANS UN MODELE

Une méthode a été développée à l'IFREMER, concernant une mesure de l'encrassement d'un tube échangeur d'eau de mer. Le dispositif de l'instrumentation est le suivant [1] :

Deux blocs de cuivre cylindriques, dont un sert de bloc de référence (fig. 1), sont clampés sur un tube cylindrique de titane. Afin de réduire la résistance au transfert de chaleur entre le titane et le cuivre, on introduit avant serrage de la graisse thermique. Un gradient de température est appliqué sur le deuxième bloc et la courbe de refroidissement est mesurée par thermocouple différentiel.

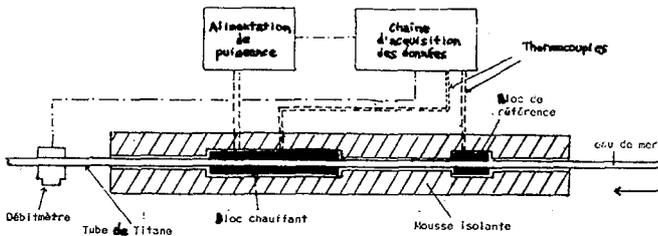


FIGURE 1 : Tube instrumenté [1]

On considère d'abord le système d'hypothèses suivant :

- la géométrie du système est cylindrique
- le flux de chaleur s'écoule radialement (on peut vérifier expérimentalement cette propriété)

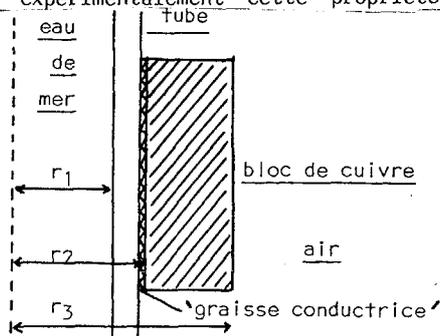


Figure 2 : Géométrie du système

Soit  $T(r,t)$  : le champ de température

$h$  : coefficient d'échange thermique entre le tube et l'eau

$h_r$  : coefficient d'échange thermique entre le bloc et le tube

$h_a$  : coefficient d'échange thermique entre le bloc et l'air

$T_o = T_{eau} = T_{air}$

Le champ  $T(r,t)$  vérifie l'équation parabolique à une dimension dans un milieu isotrope en régime de conduction transitoire. La théorie des résidus montre que :

$$T(r,t) = A_0(r) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n(r) \exp(-t/t_n)$$

où  $t_1 \gg t_i$  pour  $i > 1$

Donc pour  $t$  grand on a :

$$T(r,t) \approx A_0(r) + A_1(r) \exp(-t/t_1) \quad (1)$$

D'autre part, les coefficients  $h$ ,  $h_a$ ,  $h_r$  et  $t_1$  sont reliés par une équation du type  $H(t_1, h, h_a, h_r) = 0$  où  $H$  est le déterminant d'une matrice qui est explicitée dans [1].

Le coefficient  $h_a$  peut être pris égal à 0. Par contre on ne doit pas négliger l'effet de la résistance de contact entre le tube et le bloc de cuivre, bien qu'il soit amoindri par l'utilisation d'une graisse conductrice. Le coefficient  $h_r$  est alors estimé à partir d'une régression non linéaire et d'un passage à la limite dans l'équation de transcendance  $H = 0$  [1].

Pour déduire  $h$  de l'équation  $H = 0$  il faut pouvoir extraire des données de température la valeur de la constante temps du système. L'objet de cette communication est de montrer l'optimisation du calcul de  $t_1$  en utilisant des algorithmes de détection de rupture dans un modèle.

1. LE MODELE STATISTIQUE

Le champ des températures s'écrit,  $r$  étant fixé :

$$T(r,t) = A_0(r) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n(r) \exp(-t/t_n)$$

Cette courbe est échantillonnée pendant 2 mn environ. On considère le modèle de régression (non linéaire) suivant :

$$T_i = A_0(r) + \sum A_n(r) \exp(-t_i/t_n) + \epsilon_i$$

où  $\epsilon_i$  est un bruit dû aux fluctuations de températures et/ou aux erreurs de mesures. L'observation de la courbe de refroidissement montre trois phases distinctes (figure 3).

- Dans la phase 1,  $t$  n'est pas assez grand pour utiliser l'approximation (1)

- Dans la phase 3, la variance du bruit devient trop importante pour effectuer des calculs précis,

- Il s'agit donc de délimiter la phase 2 (l'intervalle  $[U_1, U_2]$  où la variance du bruit reste "raisonnable" et l'approximation (1) peut être utilisée.



OPTIMISATION D'UNE MESURE DE L'ENCRASSEMENT D'UN  
ECHANGEUR PAR DETECTION DE RUPTURES DANS UN MODELE

Le paramètre  $t_1$  s'obtient alors par une régression linéaire classique. Ceci amène à considérer le problème de délimitation de la bonne plage de mesure comme un problème de rupture dans un modèle.

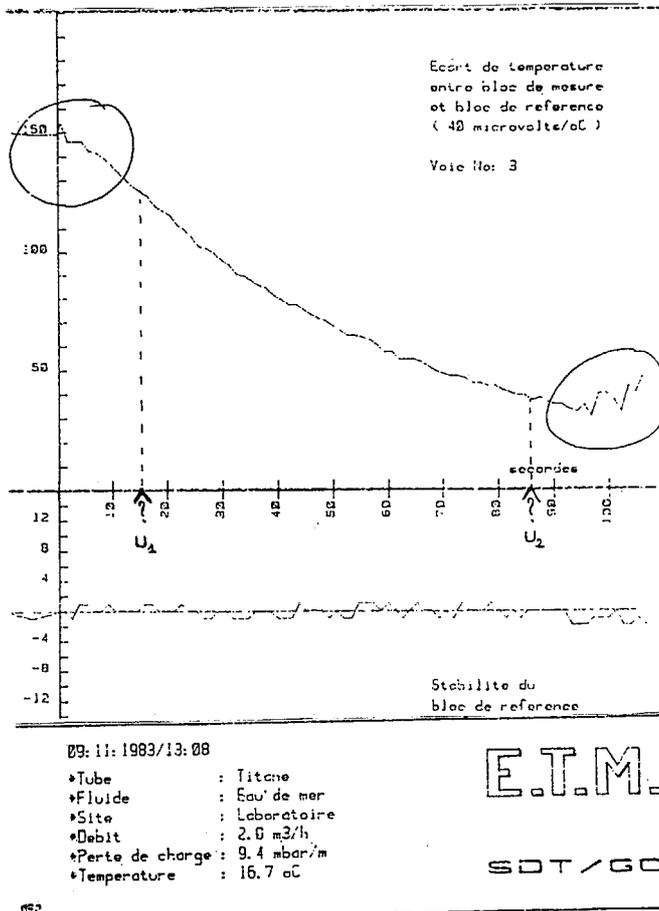


Figure 3 : Courbe de refroidissement du tube

## 2. RUPTURE DE MODELE

Un problème de rupture de modèle s'écrit de la manière suivante ([2]).

Si  $(M_\theta)_{\theta \in \Theta}$  est une famille de modèles statistiques et  $y_0, \dots, y_n$  l'échantillon d'un signal (on suppose les  $y_i$  indépendants), on veut savoir quelle hypothèse parmi deux est admissible :

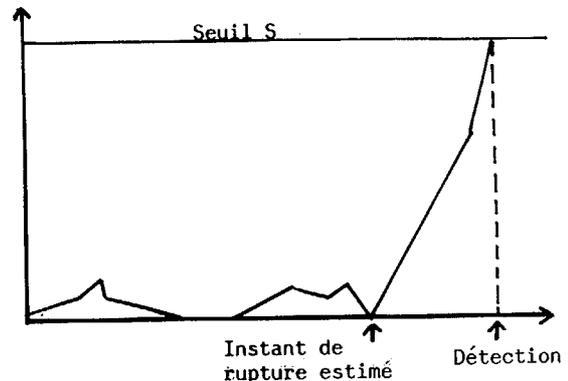
$H_0$  :  $y_0, \dots, y_n$  a pour modèle  $M_{\theta_0}$

$H_1$  : il existe  $r$ ,  $1 \leq r \leq n$  t.q.  $y_0, \dots, y_{r-1}$  a pour modèle  $M_{\theta_0}$  et  $y_r, \dots, y_n$  a pour modèle  $M_{\theta_1}$

Pour cela on utilise une méthode de détection séquentielle qui consiste à observer le passage par un seuil  $S$  de la statistique,

$$X_{n+1} = (X_n + \Psi(Y_{n+1}))^+ \text{ où } \Psi \text{ est une fonction (2)}$$

numérique telle que  $E_{\theta_0}(\Psi(Y)) < 0 < E_{\theta_1}(\Psi(Y))$



On considère en général qu'un tel algorithme est optimal si à probabilité de fausse alarme  $P$  fixée, le retard à la détection  $R$  est le plus petit possible.

On montre en utilisant la théorie des grandes déviations ([3]), que  $\Psi$  est optimal si:

$\Psi(x) = \text{Log} \frac{m_1}{m_0}(x)$  où  $m_i$  ( $i=0$  ou  $1$ ) représente la loi de  $y$  sous  $\theta_i$ .

( $\Psi$  est le logarithme du rapport de vraisemblance entre  $m_0$  et  $m_1$ )

On a alors :  $S = -\text{Log } P$

$R = \frac{-\text{Log } P}{I(\theta_0, \theta_1)}$  où  $I(\theta_0, \theta_1)$  est l'information de Kullback entre  $m_0$  et  $m_1$ .

## 3. DETERMINATION DE LA FENETRE D'AJUSTEMENT

L'algorithme mis au point permet de calculer tout d'abord la borne supérieure  $U_2$ .

A partir de l'équation (1) on considère le modèle linéaire suivant :

$$\text{Log } T_n = y_n = a x_n + b + \epsilon_n$$

où  $\epsilon_n$  est une suite de loi  $N(0, \sigma_n^2)$  indépendantes. Avant l'instant de rupture  $U_2$  on a  $\sigma_n^2 = \sigma_0^2$  et après  $U_2$   $\sigma_n^2 = \sigma_1^2$ . Comme la variance  $\sigma_1^2$  n'est pas connue, on écrit que  $\sigma_1^2 = k \sigma_0^2$  où  $k$  est un paramètre fixé représentant la variation de variance minimum à détecter. L'algorithme de détection (2) utilise le maximum de données pour l'estimation des paramètres du modèle ; il est robuste au choix de  $k$  puisque pour  $k$  variant entre 2 et 20 on estime le même point de rupture [4].

L'algorithme commence pour  $t=0$  ; l'approximation par (1) n'est pas bonne pour les premières mesures. C'est pourquoi lors d'une rupture on teste si la rupture observée est due à un changement de moyenne d'amplitude minimum  $\mu$  ou à un changement de variance du bruit  $\epsilon$ .



**OPTIMISATION D'UNE MESURE DE L'ENCRASSEMENT D'UN  
ECHANGEUR PAR DETECTION DE RUPTURES DANS UN MODELE**

Pour déterminer la borne inférieure  $U_1$  on déroule à partir de  $U_2$  un algorithme du type (2) en détectant un changement de moyenne.

La fenêtre  $[U_1 ; U_2]$  est alors optimale pour le modèle exponentiel approché (1).

Algorithme pour le calcul de  $U_2$

$k, \mu, S, U$  sont des paramètres fixés (les expériences ont montré que l'algorithme était robuste au choix de ces paramètres).

$\epsilon_n$  est une suite de loi  $N(0, \sigma_0^2)$  indépendantes

$\hat{\sigma}_{0,n}^2$  est l'estimation séquentielle de  $\sigma_0^2$

On a :  $X_{n+1} = (X_{n,1} + \Psi_1(\epsilon_{n+1}))^+$

$$X_{n+1,2} = \begin{cases} X_{n,2} + \Psi_2(\epsilon_{n+1}) & \text{si } X_{n+1,1} > 0 \\ 0 & \text{si } X_{n+1,1} = 0 \end{cases}$$

où  $\Psi_1(\epsilon_n) = \text{Log} \frac{1}{2} \left[ \exp\left(\frac{\mu(\epsilon_n - \mu/2)}{\hat{\sigma}_{0,n}^2}\right) + \frac{1}{\sqrt{k}} \exp\left(\frac{\epsilon_n^2}{2\hat{\sigma}_{0,n}^2} [1-1/k]\right) \right]$

$$\Psi_2(\epsilon_n) = \frac{1}{2} \text{Log} k - \frac{\epsilon_n^2}{2\hat{\sigma}_{0,n}^2} [1-1/k]$$

$$+ \frac{\mu}{\hat{\sigma}_{0,n}^2} \left( \epsilon_n - \frac{\mu}{2} \right)$$

Si  $X_{n,1}$  dépasse  $S$  il y a rupture

Si  $X_{n,2}$  dépasse  $U$  la rupture est une rupture de moyenne

Si  $X_{n,2}$  dépasse  $-U$  la rupture est une rupture de variance.

Algorithme pour le calcul de  $U_1$

Le modèle est alors

$$y_{U_2-n} = a x_{U_2-n} + b + \epsilon'_{n+1}$$

et  $X_{n+1} = (X_n + \Psi(\epsilon'_{n+1}))^+$

avec  $\Psi(\epsilon'_{n+1}) = \frac{\mu}{\hat{\sigma}_{0,n+1}^2} (\epsilon'_{n+1} - \mu/2)$

Si  $X_{n+1}$  dépasse  $S$  il y a rupture : on a donc  $U_1$

4. APPLICATION

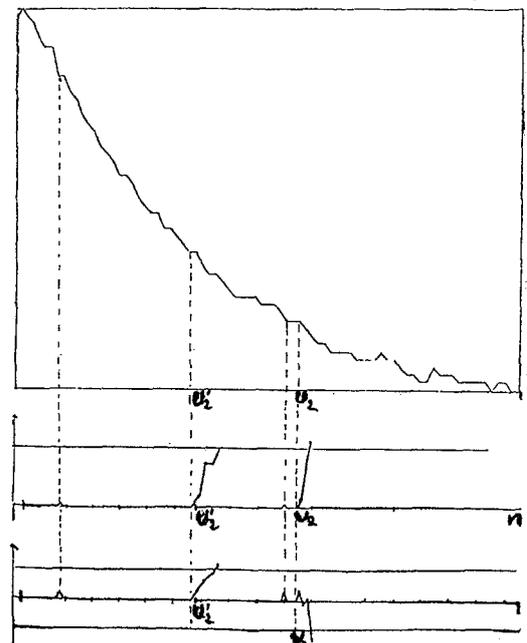
Recherche de  $U_2$

n	$X_{n,1}$	$X_{n,2}$
2	.0000	.0000
3	.0000	.0000
4	.0000	.0000
5	.0000	.0000
6	.0000	.0000
7	.0000	.0000
8	.0642	.9391
9	.0000	.0000
10	.0000	.0000
11	.0000	.0000
12	.0000	.0000
13	.0000	.0000
14	.0000	.0000
15	.0000	.0000
16	.0000	.0000
17	.0000	.0000
18	.0000	.0000
19	.0000	.0000
20	.0000	.0000
21	.0000	.0000
22	.0000	.0000
23	.0000	.0000
24	.0000	.0000
25	.0000	.0000
26	.0000	.0000
27	.0000	.0000
28	.0000	.0000
29	.0000	.0000
30	.0000	.0000
31	2.1941	1.4128
32	6.4208	3.1819
33	6.3419	4.0450
34	9.0048	5.7018

$U_2 \rightarrow$

n	$X_{n,1}$	$X_{n,2}$
31	.0000	.0000
32	.0000	.0000
33	.0000	.0000
34	.0000	.0000
35	.0000	.0000
36	.0000	.0000
37	.0000	.0000
38	.0000	.0000
39	.0000	.0000
40	.0000	.0000
41	.0000	.0000
42	.0000	.0000
43	.0000	.0000
44	.3466	1.5171
45	.0000	.0000
46	.0000	.0000
47	.0000	.0000
48	1.4144	1.3513
49	6.8576	-1.1474
50	10.0199	.0765
51	21.7611	-5.9450

$U_2 \rightarrow$

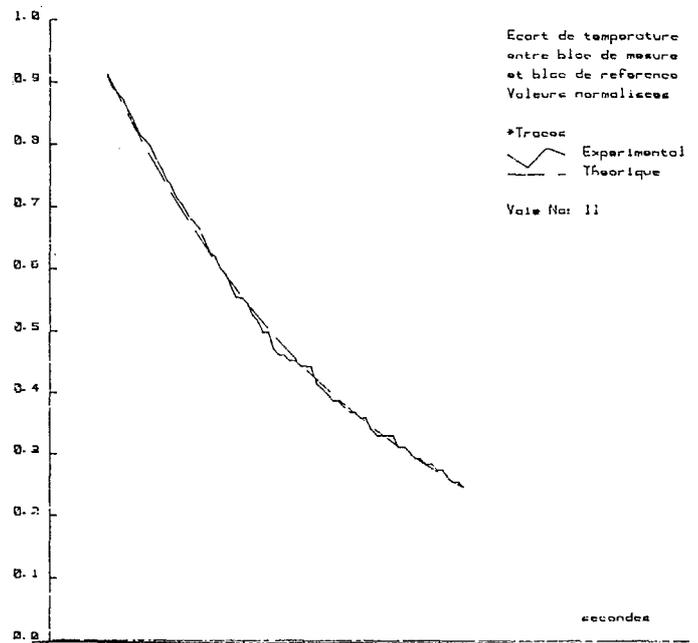


OPTIMISATION D'UNE MESURE DE L'ENCRASSEMENT D'UN ECHANGEUR PAR DETECTION DE RUPTURES DANS UN MODELE

RECHERCHE DE  $U_1$

$U_2 - n$	Statistique de détection
2	.0000
3	.0000
4	.0000
5	.0000
6	.0000
7	.0000
8	.0000
9	.0000
10	.0000
11	.0000
12	.7370
13	3.0778
14	3.7151
15	3.0267
16	1.0128
17	.6017
18	.0000
19	.0000
20	.0000
21	.0000
22	.0000
23	.0000
24	.0000
25	.0000
26	.0000
27	.0000
28	.0000
29	.0000
30	.0000
31	.0000
32	.0000
33	.0000
34	.0000
35	.0000
36	.0000
37	.0000
38	.0000
39	.0000
40	.0000
41	.4172
42	.0000
43	.0000
44	.2533
45	.2484
46	1.1298
47	2.9167
48	7.7303

$U_1 \rightarrow$



06: 03: 1985/13: 34

- \*Tube : Titane
- \*Fluide : Eau de Mer
- \*Site : Ste Anne
- \*Vitesse moyenne : 1.51 m/s
- \*Perte de charge : 12.43 mbar/m
- \*Temperature : 8.69 oC
- \*Nettoyé le : 19: 02: 1985/11: 00

E.T.M.

SOT/GO

F25

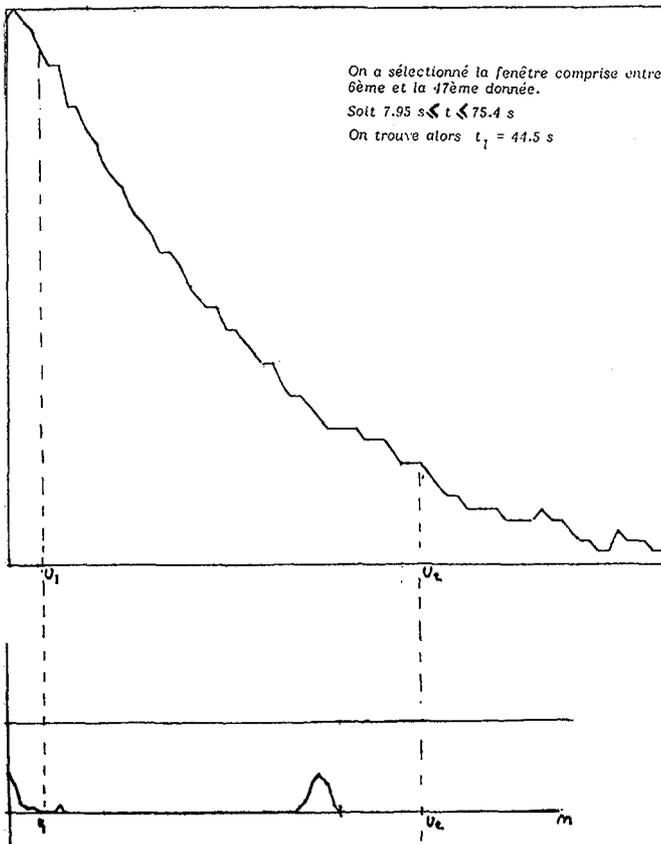


Figure 4 : Ajustement du modèle sur la fenêtre sélectionnée

CONCLUSION

Une procédure de sélection d'une fenêtre temporelle pour l'ajustement de la courbe de refroidissement d'un tube instrumenté a été mise au point. Elle repose essentiellement sur la définition d'algorithmes séquentiels de détection d'une rupture dans un modèle. Le critère d'optimisation est de minimiser le retard à la détection pour un niveau de probabilité de fausse alarme donné. Par suite on a pu automatiser toute la chaîne de calcul permettant d'estimer le coefficient d'échange thermique d'un tube échangeur.

REFERENCES

[1] Labeyrie J. et Lemoine L., A data analysis method to estimate heat transfer coefficient for exchanger tubes, Proc. 2nd Conf. Int. CEM, CML Publication, 1984.  
 [2] Deshayes J. et Picard D., Tests de rupture en statistique, Thèse d'Etat, Univ. Paris Sud, 1983.  
 [3] De Cambry O., Modélisation de paquets d'erreurs en transmission numérique, Thèse de 3ème cycle, Université Paris Sud, 1984.  
 [4] De Cambry O., Sélection automatique d'une fenêtre temporelle pour l'ajustement de la courbe de refroidissement d'un tube échangeur instrumenté, Contrat IFREMER n° 84/0245, Publ. LEMPAP SRCH/01, 1984.

