



**ESTIMATION DES FLUCTUATIONS DE TEMPERATURE
DANS UNE TUYAUTERIE A PARTIR DE MESURES DE
DEFORMATIONS EN PEAU EXTERNE**

***ESTIMATION OF PIPING TEMPERATURE FLUCTUATIONS
BASED ON EXTERNAL STRAIN MEASUREMENTS***



EDF

Direction des Etudes et Recherches

**Electricité
de France**

**SERVICE ENSEMBLES DE PRODUCTION
Département Retour d'Expériences Mesures-Essais**

1993

MORILHAT P.

MAYE J. P.

**ESTIMATION DES FLUCTUATIONS DE
TEMPERATURE DANS UNE TUYAUTERIE A
PARTIR DE MESURES DE DEFORMATIONS EN
PEAU EXTERNE**

***ESTIMATION OF PIPING TEMPERATURE
FLUCTUATIONS BASED ON EXTERNAL STRAIN
MEASUREMENTS***

Pages : 8

93NB00142

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

© Copyright EDF 1993

ISSN 1161-0611

SYNTHÈSE :

La difficulté d'instrumenter en paroi interne les tuyauteries de réacteurs nucléaires soumises à des transitoires thermiques conduit à estimer les variations de température et de contrainte dans la paroi à partir d'une instrumentation externe en thermocouples et jauges de déformation.

La résolution de ce problème inverse est faite par une analyse spectrale. Connaissant la fonction de transfert harmonique de la paroi, réponse à une sollicitation harmonique, le signal en peau interne s'obtient par convolution de la fonction de transfert inverse du système et du signal mesuré en peau externe. On montre que l'effet intégral de la mesure de déformation permet de détecter des fluctuations de température interne dans une gamme de fréquence plus large que les thermocouples.

EXECUTIVE SUMMARY :

Due to the difficulty to carry out measurements at the inner sides of nuclear reactor piping subjected to thermal transients, temperature and stress variations in the pipe walls are estimated by means of external thermocouples and strain-gauges.

This inverse problem is solved by spectral analysis. Since the wall harmonic transfer function (response to a harmonic load) is known, the inner side signal will be obtained by convolution of the inverse transfer function of the system and of the signal measured on the outer side. It is shown that the integral effect of the strain measurement enables detection of internal temperature fluctuations in a frequency range beyond the scope of the thermocouples.

**ESTIMATION DES FLUCTUATIONS DE TEMPÉRATURE DANS UNE TUYAUTERIE
A PARTIR DE MESURES DE DEFORMATIONS EN PEAU EXTERNE**

J.P. MAYE

P. MORILHAT

Université de Poitiers
Laboratoire d'Etudes Thermiques
40, Avenue du Recteur Pineau
86022 - POITIERS CEDEX

ELECTRICITE DE FRANCE
Etudes et Recherches - Dept. REME
25 Allée Privée, Carrefour Pléyel
93206 - SAINT DENIS

NOMENCLATURE

a	: diffusivité thermique du matériau (m^2s^{-1})
λ	: conductivité thermique ($Wm^{-1}C^{-1}$)
e	: épaisseur de la tuyauterie (m)
E	: module de Young (MPa)
α	: coefficient de dilatation linéique (C^{-1})
ν	: coefficient de Poisson
f	: fréquence de la fluctuation (Hz)
x	: distance à la peau interne d'un point dans la paroi (m)
$\bar{T}(x, f)$: transformée de Fourier de la température au point x
$\bar{\sigma}(x, f)$: transformée de Fourier de la contrainte au point x
$\bar{T}_o(f)$: transformée de Fourier de la température fluide
h	: coefficient d'échange fluide paroi ($Wm^{-2}C^{-1}$)
$H(f)$: fonction de transfert fluide-paroi
$\theta(x, f)$: fonction de transfert température-température
$\Sigma(x, f)$: fonction de transfert température-contrainte
$k = \sqrt{\frac{\pi f}{a}}$: pseudo vecteur d'onde (m^{-1})

1. INTRODUCTION

Certaines tuyauteries particulièrement sollicitées des réacteurs nucléaires à eau pressurisée sont soumises à de la fatigue thermique créée par des fluctuations de température à haute fréquence, apparaissant par exemple dans le cas de fluide stratifié. Les fluctuations de l'interface chaud-froid, sous l'effet de la turbulence ou d'ondes de gravité, peuvent conduire à l'apparition de fissuration thermique (thermal striping) en surface de la paroi interne de la conduite.

La nécessité d'utiliser sur site des méthodes de détection non intrusives conduit à développer des modèles de restitution des champs de tempéra-

ture et de contrainte dans la paroi à partir d'une instrumentation externe (thermocouples ou jauges de déformation).

2. RESTITUTION DES TEMPERATURES ET DES CONTRAINTES INTERNES

Un problème de type inverse doit être résolu : connaissant une grandeur de sortie (température ou contrainte externes), on cherche à déterminer une grandeur d'entrée (température ou contrainte internes).

2.1 Objectifs

Les fluctuations de température dans le fluide sont filtrées par l'échange thermique entre le fluide et la paroi et par l'épaisseur de la paroi.

On cherche à déterminer la fonction de transfert harmonique (réponse à une sollicitation harmonique) de l'ensemble zone d'échange-paroi. Le filtre constitué par la paroi étant connu, la température (ou la contrainte) en tout point de la paroi s'obtient sous forme du produit de convolution du signal d'entrée (température fluide ou flux à la paroi) et de la réponse harmonique du système.

Comme on désire estimer à partir d'une instrumentation externe en thermocouples ou jauges de déformation la température dans la paroi, il est nécessaire d'établir deux fonctions de transfert. La première relie les températures en deux points de la paroi, la seconde établit la relation entre contrainte et température.

2.2 Hypothèses

- a) On fait abstraction de la conduction azimuthale dans la paroi due à la stratification, en supposant que le problème est purement local, monodimensionnel (radial).
- b) Les caractéristiques thermiques du matériau (diffusivité a , conductivité λ) sont constantes (thermique linéaire).
- c) La paroi extérieure est parfaitement calorifugée.

- d) L'échange entre le fluide et la paroi se traduit par un coefficient d'échange h , dépendant éventuellement du temps.
 e) La température fluide admet une transformée de Fourier (signal à énergie finie).

2.3 Fonctions de transfert harmoniques du système
 Avec les hypothèses précédentes, l'équation de la chaleur :

$$a \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

devient par transformation de Fourier :

$$\frac{d^2 \bar{T}(x,f)}{dx^2} - i \frac{2\pi f}{a} \bar{T}(x,f) = 0 \quad (2)$$

$$\text{où } \bar{T}(x,f) = \int_{-\infty}^{\infty} T(x,t) e^{-i2\pi f t} dt \quad (3)$$

En supposant le coefficient d'échange h constant, les conditions limites s'écrivent :

$$\text{- en } x = 0 \quad - \lambda \left(\frac{d\bar{T}}{dx} \right) = h (\bar{T}_0(f) - \bar{T}(0,f)) \quad (4)$$

$$\text{- en } x = a \quad - \lambda \left(\frac{d\bar{T}}{dx} \right) = 0 \quad (5)$$

La solution de (1) correspondant au régime stationnaire périodique a pour expression :

$$\bar{T}(x,f) = H(f) \cdot \theta(x,f) \cdot \bar{T}_0(f) \quad (6)$$

où H et θ sont des termes dus respectivement à l'échange fluide-paroi et au filtrage en température de la paroi de la tuyauterie.

Ces termes de filtrage ont pour expression [2] :

$$H(f) = \frac{1}{1 + \frac{\lambda k(1+i) \operatorname{th}(1+i) k e}{h}} \quad (7)$$

$$\theta(x,f) = \frac{\operatorname{ch}(1+i) k (e-x)}{\operatorname{ch}(1+i) k e} \quad (8)$$

où $k = \sqrt{\frac{\pi f}{a}}$ est l'analogue d'un vecteur d'onde.

La contrainte thermique axiale créée par le gradient radial de température dans la paroi s'écrit :

$$\sigma(x,t) = \frac{E \alpha}{1 - \nu} [T_m - T(x,t)] \quad (9)$$

où T_m est la température moyenne de la paroi à l'instant t .

Par transformation de Fourier, il vient :

$$\bar{\sigma}(x,f) = \frac{E \alpha}{1 - \nu} \{ \bar{T}_m(f) - \bar{T}(x,f) \} \quad (10)$$

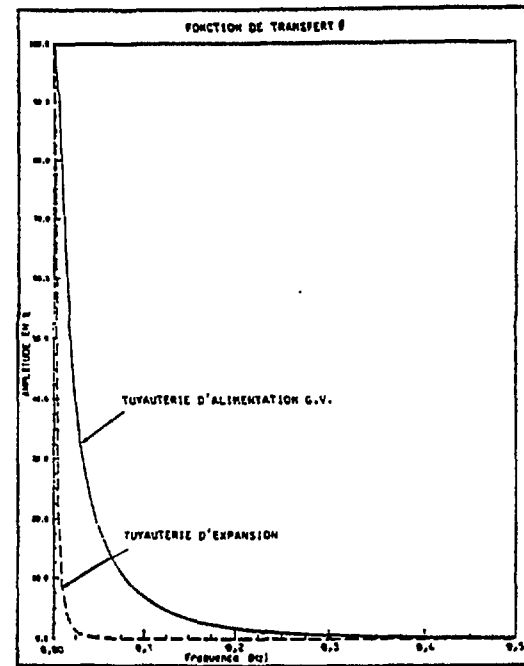


Figure 1. Amortissement en température de la paroi pour deux types de tuyauterie

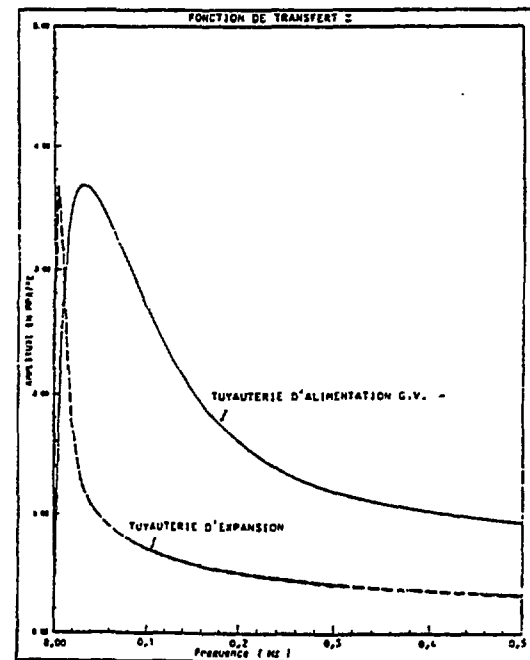


Figure 2. Amortissement en contrainte de la paroi pour deux types de tuyauterie

$$\text{avec : } \bar{T}_m(f) = \frac{1}{e} \int_0^e \bar{T}(x, f) dx \quad (11)$$

Après intégration de (11) à l'aide de (6), la formule (10) devient :

$$\bar{\theta}(x, f) = H(f) \cdot \bar{\Sigma}(x, f) \cdot \bar{T}_0(f) \quad (12)$$

Le terme de filtrage en contrainte de la paroi a pour expression [2] :

$$\bar{\Sigma}(x, f) = \frac{E \alpha}{1-\nu} \left[\frac{(1-i) \operatorname{th}(1+i) k e}{2 k e} - \frac{\operatorname{ch}(1+i) k(e-x)}{\operatorname{ch}(1+i) k e} \right] \quad (13)$$

Le problème inverse posé est résolu par inversion des formules (6) et (12) et par déconvolution.

Les fonctions de transfert H , θ et Σ dépendent des caractéristiques thermiques et géométriques de la tuyauterie et de la fréquence f . Les figures 1 et 2 présentent l'évolution de θ et Σ en fonction de f pour la ligne d'expansion du pressuriseur (acier 316L inox, $e = 35,7$ mm) et la tuyauterie d'alimentation du générateur de vapeur (acier au carbone A42, $e = 21,4$ mm).

La figure 3 présente, pour différentes valeurs de h , l'évolution de H dans le cas de la tuyauterie d'alimentation du générateur de vapeur.

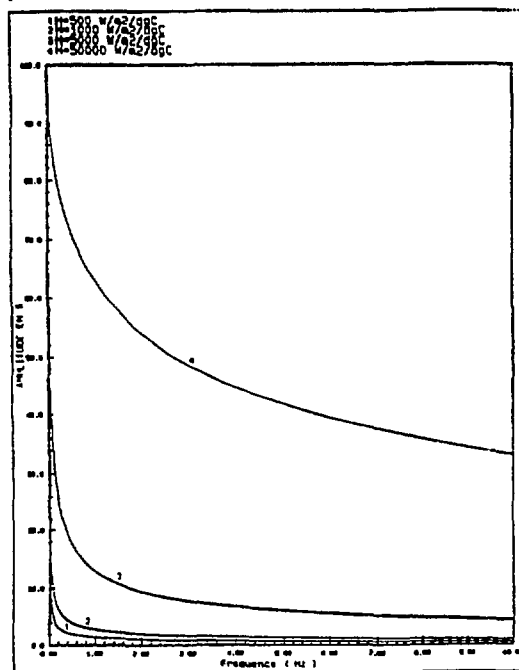


Figure 3. Amortissement des fluctuations de température entre le fluide et la paroi en fonction du coefficient d'échange

La comparaison des figures 1 et 2 montre que la fonction de transfert θ constitue un filtre beaucoup plus important que la fonction de transfert Σ . Il est donc préférable de résoudre le problème inverse à l'aide de Σ (équation 12) plutôt que par θ (équation 6).

L'analyse des fonctions Σ et θ montre que, pour la tuyauterie alimentaire, des variations de températures en peau interne sont indétectables en peau externe par des thermocouples pour des fréquences supérieures à 0,5 Hz, alors que cette limite est repoussée au-delà de 25 Hz pour des mesures de déformation (le phénomène de fissuration thermique se situe dans une gamme fréquentielle de 0 à 10 Hz).

Les mesures de température ont un effet ponctuel : elles ne détectent que l'onde thermique passant en leur voisinage.

En revanche, les mesures de déformation ont un effet intégral qui leur permet de détecter des fluctuations rapidement atténuées dans l'épaisseur de la paroi.

Cet effet intégral explique les meilleures capacités de détection des jauges comparativement aux mesures classiques de température.

3. DOMMAGE OBSERVABLE A PARTIR D'UNE INSTRUMENTATION EXTERNE

Le modèle proposé permet de calculer la contrainte en peau interne.

Connaissant la limite d'endurance du matériau, on peut déterminer, en fonction de la fréquence f , l'amplitude de fluctuation interne ΔT_0 qui engendre un dommage mécanique.

Par ailleurs, on trace dans le même plan ($\Delta T_0, f$) la limite de variations de température ou de contrainte observables à partir d'une instrumentation externe.

Trois zones apparaissent :

- une zone dans laquelle il n'y a pas de dommage,
- une zone dans laquelle il y a un dommage observable, à partir de la paroi externe,
- une zone dans laquelle il y a un dommage que l'on ne peut observer à partir de la paroi externe.

La figure 4 présente, pour la tuyauterie d'alimentation du générateur de vapeur, en prenant un coefficient d'échange infini, les différents domaines. La limite d'observation est définie à partir d'une instrumentation externe dont la précision de mesure est [3] :

- pour les thermocouples : 0,1 °C,
- pour les jauges de déformation : 10 $\mu\text{m/m}$ (soit 2,8 MPa pour la tuyauterie d'alimentation du générateur de vapeur).

L'abaque de la figure 4 permet de définir une instrumentation adaptée au phénomène qu'on désire étudier. Par exemple, on cherche à estimer la nocivité des fluctuations d'amplitude 100 °C dans une gamme de fréquences, de 1 à 10 Hz. La figure 4 montre que ces fluctuations sont dommageables, et qu'une instrumentation en jauges permet de les détecter.

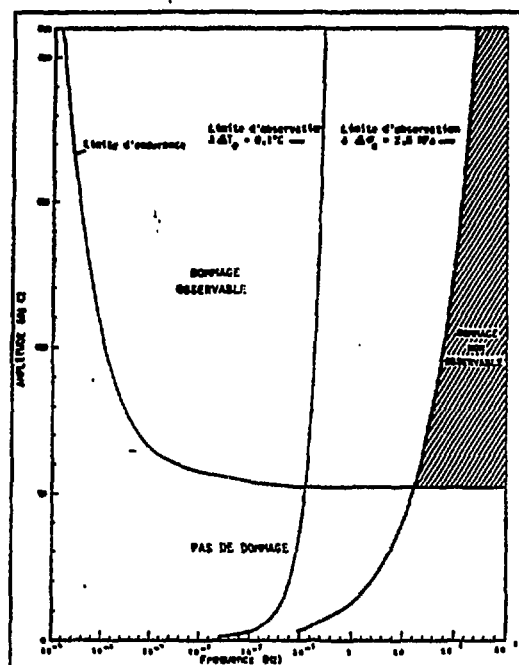


Figure 4. Damage observable à partir d'une instrumentation externe

4. APPLICATION

La méthode proposée est appliquée au cas de la ligne d'expansion du pressuriseur, à partir d'enregistrements réalisés à CRUAS 2. On dispose d'une température mesurée dans le fluide, pendant une phase de télérégie (régime quasi périodique).

On effectue une simulation numérique en imposant la température fluide sur la paroi interne (coefficient d'échange infini).

Le calcul se décompose en deux parties :

- Calcul direct du champ thermique dans la paroi à partir de la température fluide par un modèle aux différences finies dans lequel on assimile la paroi du cylindre à une plaque, calorifugée en peau externe. Le coefficient d'échange fluide-paroi est supposé infini.
- Calcul inverse, par analyse spectrale, de la température interne à partir de la température externe et de la contrainte axiale externe.

Les résultats sont présentés sur la figure 5.

Dans le cas de fluctuations de fréquences élevées (cadence d'acquisition de 0,5 s), la paroi filtre considérablement le signal (figure 5a, courbe 2). La contrainte externe, bien que lissée, présente néanmoins des fluctuations (figure 5b, courbe 1).

La température interne calculée à partir de la température externe est totalement bruitée. Pour cette raison, elle n'est pas représentée sur la figure 5c. En revanche, la contrainte externe permet de retrouver la température interne aussi bien du point de vue de la fréquence des fluctuations que de leur amplitude (figure 5d).

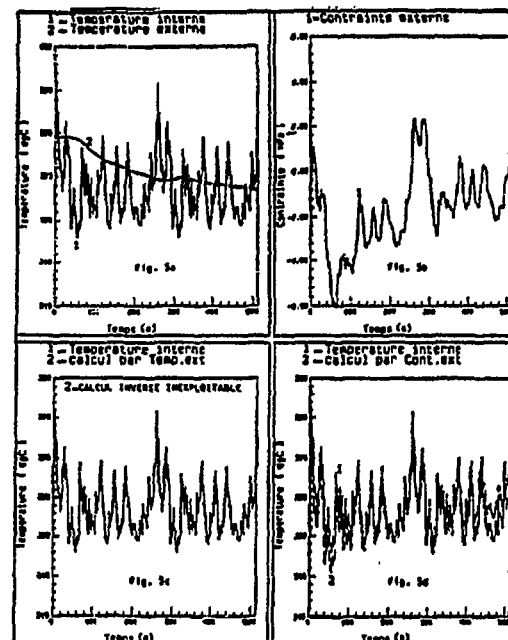


Figure 5. Calcul de la température interne à partir des mesures externes pour des fréquences rapides dans le cas d'un signal réel

5. CONCLUSION

La résolution d'un problème thermique inverse est rendue possible en traduisant le problème dans l'espace fréquentiel.

La méthode proposée permet de reconstituer en régime périodique les fluctuations de température et de contrainte en paroi interne d'une tuyauterie à partir d'une instrumentation en paroi externe, dans la gamme de fréquence du phénomène de faïençage thermique (0-10 Hz).

Par ailleurs, elle conduit à définir, en fonction de l'échange fluide-paroi, la gamme fréquentielle dans laquelle un dommage peut être détecté à partir d'une instrumentation externe en jauges de déformation ou thermocouples.

REFERENCES

- Carlsaw-Jaeger, "Conduction of heat in solids". Oxford Press, Second Edition 1980.
- Brendle E., Morilhat P., "Faïençage thermique - Estimation des fluctuations thermiques dans une tuyauterie à partir de mesures de déformation en peau externe". Octobre 1989. HP 16/89/40. Note interne EDF.
- Avril J., "Encyclopédie VISHAY d'analyse de contraintes". Vishay Micromesures, 1974.

EDF

*Direction des Etudes
et Recherches*

*Electricité
de France*

*Service Information
Prospective et Normalisation*

CLAMART Le 12/10/94

*Département Systèmes d'information
et de documentation*

MME GAGNEBIEN G.
CEA - CE SACLAY

*Groupe Exploitation
de la Documentation Automatisée*

MIST-SBDS-SPRI

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

91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

à l'attention de :

MEMOIRE TECHNIQUE ELECTRONIQUE

Cette feuille est détachable grâce à la microperforation sur le coté droit.

Référence de la demande : **F488778**
Origine : **AVIS DE PARUTION NORMES E**

Votre commande :

Numéro du document : **93NB00142**

**Titre : ESTIMATION DES FLUCTUATIONS DE TEMPERATURE DANS UNE TUYAUTERIE A
PARTIR DE MESURES DE DEFORMATIONS EN PEAU EXTERNE**

Auteurs : **MORILHAT P./MAYE J. P.**

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

Référence du document : **SANS**

Nombre de pages: **0008**

Nombre d'exemplaires : **001**

Support : **P**