

Service de Documentation

F91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

Li

COMPORTEMENT DYNAMIQUE NON-LINEAIRE DES FAISCEAUX DE TUBES SOUMIS  
A DES ECOULEMENTS TRANSVERSES

DEADRIEU J.-M. (FR) 1.

CEA Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay, 91 - Gif-sur-Yvette (FR).  
Dept. d'Etudes Mecaniques et Thermiques

MITUNES J.

Junta de Energia Nuclear, Sacavem (Portugal). Dept. Nuclear Energy  
and Engineering

Communication présentée à : 9. French Congress of Mechanics

Metz (FR)  
5-8 Sep 1989

# COMPORTEMENT DYNAMIQUE NON-LINEAIRE DES FAISCEAUX DE TUBES SOUMIS A DES ECOULEMENTS TRANSVERSES

B.BEAUFILS\*, J.ANTUNES\*\*, F.AXISA\*

\* CEN.S/DEMT. Département des Etudes Mécaniques et thermiques  
Centre d'Etudes Nucléaires, Saclay, France

\*\*INETI/ICEN/DEEN Nuclear Energy and Engineering Department Portugal Sacaven

## 1 - INTRODUCTION

Un faisceau de tubes soumis à un écoulement transverse peut-être le siège de vibrations intenses. La figure 1 schématise l'évolution du niveau vibratoire avec la vitesse  $U$  de l'écoulement. On note la présence d'une vitesse critique  $U_c$ , au delà de laquelle l'amplitude vibratoire augmente brutalement. Ceci dénote la présence d'une instabilité dynamique des tubes, appelée instabilité fluide élastique, car elle provient d'un couplage non conservatif entre l'écoulement permanent et le mouvement des tubes. L'instabilité fluide élastique conduit généralement à une rupture par fatigue à brève échéance.

Ce phénomène peut prendre place dans les échangeurs de chaleur industriels. Pour remédier à ce risque, il convient de multiplier le nombre de points d'appui des tubes. De tels supports intermédiaires sont généralement montés avec des petits jeux résiduels, qui permettent également d'accommoder les dilatations thermiques. Il s'en suit une interaction dynamique non linéaire entre tubes et supports sous forme d'impacts et de frottement, cause importante d'usure des composants.

Dans ce papier, on présente un ensemble de travaux effectués au C.E.A. [1, 2, 3], permettant de modéliser numériquement de tels phénomènes afin de procéder à des analyses prédictives de risques vibratoires d'échangeurs industriels.

## 2 - METHODES DE L'ANALYSE NON LINEAIRE

### 2.1 - Modélisation de l'instabilité fluide-élastique

Il n'existe pas un modèle unique d'instabilité fluide-élastique ; les forces exercées par le fluide secondaire traversant le faisceau à la vitesse moyenne  $U$ , sont de nature fort complexes. On se limite à des formulations simplifiées.

Il est commode de remplacer ces forces dans les équations du mouvement par un premier amortissement négatif  $\zeta^*$  qu'elles introduisent sur le premier mode instable, [3] :

$$(2) \quad \zeta^* = \zeta (1 - U/U_c)^2$$

où  $\zeta$  est le taux d'amortissement de ce mode, lorsque le tube est entouré par le fluide secondaire à vitesse nulle.

## 2.2 - Simulation numérique du mouvement

Les équations du mouvement, où les forces non linéaires sont reportées au second membre, sont projetées sur la base modale convenablement tronquée des tubes. La solution du problème est obtenue par intégration numérique pas à pas des équations, à l'aide d'un algorithme de type explicite.

La troncature de la base modale et les effets locaux du contact sont pris en compte au travers d'une raideur équivalente de choc  $K_C$ , [3]. Les forces qu'exercent alors les appuis à jeux sur le tube sont :

$$(3) \quad \begin{aligned} F_c &= -K_c (X - \delta_c) & \text{Si } X \geq \delta_c \\ F_c &= 0 & \text{Si } X < \delta_c \end{aligned}$$

avec  $\delta_c$  valeur du jeu  
 $X$  déplacement du tube au droit de l'appui à jeux

L'usure qui découle de l'interaction tube-support peut être estimée à l'aide de la formulation semi-empirique d'Archard, [1] :

$$(4) \quad \frac{dV(t)}{dt} = K_u \bar{W}$$

avec  $V(t)$  volume usé au bout du temps  $t$   
 $K_u$  coefficient spécifique d'usure  
 $\bar{W}$  puissance moyenne d'usure

On obtient une première estimation de  $W$  par l'équation :

$$(5) \quad \bar{W} = \alpha f \sigma \bar{F}$$

avec  $f$  fréquence fondamentale du mouvement  
 $\sigma$  écart-type du déplacement du droit de l'appui à jeux

$\bar{F}$  force moyenne de choc

$$\bar{F} = \frac{1}{T} \int_T |F_c| dt$$

$T$  durée de l'analyse statistique

et où  $\alpha$  est un coefficient souvent compris entre 3 et 7.

## 3 - ETUDE NUMERIQUE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE NON-LINEAIRE

Le comportement dynamique de systèmes linéairement instables, dont le mouvement est limité par des chocs, peut être très varié. Ceci peut s'illustrer sur un système simple tel qu'un tube, articulé à ses extrémités, ayant un support à jeux (fig. 2) et possédant un amortissement négatif (cf. équation (2)). On ne considère que les vibrations dans le plan  $(X, Z)$ .

Les trajectoires obtenues sur le diagramme de phase, vitesse en fonction du déplacement au droit de l'appui à jeux), (fig. 3), montrent les types de mouvement obtenus à différentes vitesses d'écoulement adimensionnelles  $U/U_c$ .

La figure 3a montre une trajectoire périodique, où chaque cycle vibratoire décrit la même courbe. Sur la figure 3b, le mouvement est pseudo-périodique ; la trajectoire reste voisine d'une trajectoire moyenne périodique ; le mouvement est une combinaison d'oscillations à des fréquences non rationnelles entre elles. Sur la figure 3c, la trajectoire est représentée par un nuage de points, traduisant la stockasticité de la réponse dynamique du système.

La figure 4a montre que, lorsque la trajectoire est périodique, les forces de choc au cours du temps sont des impacts régulièrement espacés, d'amplitude constante. Lorsque le mouvement est pseudo-périodique, l'amplitude des forces d'impact est fluctuante, (fig. 4b). Enfin, lorsque la trajectoire est chaotique, les forces de choc ont un caractère aléatoire très prononcé, (fig. 4c).

Chacun de ces types de mouvement apparaît pour différentes vitesses d'écoulement. Le passage de l'un à l'autre peut s'accompagner d'une forte augmentation des paramètres dynamiques moyens. Ainsi, lorsque le paramètre  $U/U_c$  passe de 2,5 à 3, la fréquence de mouvement augmente de 14 à 20 Hz, (fig. 5) ; la force moyenne de choc croît de 1 à 13 N (fig. 6), et la puissance moyenne d'usure se trouve multipliée par un facteur 20, (fig. 7). On note que les valeurs de  $\dot{W}$  obtenues ne correspondent pas à des niveaux de puissance d'usure admissibles, c'est à dire quelques mW ; par contre, ce genre d'étude met bien en évidence certains risques vibratoires susceptibles d'apparaître sur des échangeurs industriels.

#### 4 - CONCLUSIONS

L'analyse prédictive du comportement vibratoire des faisceaux de tubes en instabilité fluide élastique nécessite la prise en compte des détériorations dues aux chocs des tubes sur leurs appuis à jeux.

La méthode développée au C.E.A/D.E.M.T, que l'on a présentée ici appliquée à un système simple, permet de traiter des cas beaucoup plus complexes, où les comportements de base décrits dans le paragraphe 3 se retrouvent.

#### REFERENCES

- [1] AXISA, F., ANTUNES, J., VILLARD, B.,  
" Overview of Numerical Methods for Predicting Flow-Induced Vibration and Wear of Heat-Exchanger Tubes ",  
ASME, PVP Conference, Chicago, Vol 104, pp 147-159, (1986)
- [2] ANTUNES, J., AXISA, F., BEAUFILS, B., GUILBAUD, D.,  
" Coulomb Friction Modelling in Numerical Simulations of Vibration and Wear Work Rate of Multispan Tube Bundles ",  
ASME, HT & PVP Conference, Chicago, Vol 5, PP 157-176, (1988)
- [3] ANTUNES, J.,  
" Contribution à l'Etude des Vibrations de Faisceaux de Tubes en Ecoulement Transversal ",  
Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6, (1986)

MAQUETTE OVA - DÉPLACEMENT MESURÉ  
ÉCOULEMENT EN EAU

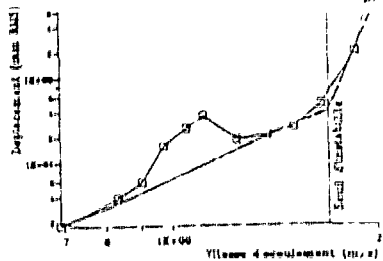


Figure 1

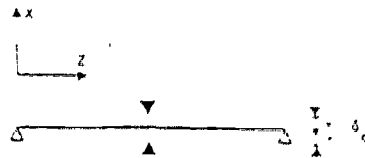


Figure 2

Tube articulé à ses extrémités  
avec butées à jeux au milieu de sa longueur

(a)

(b)

(c)

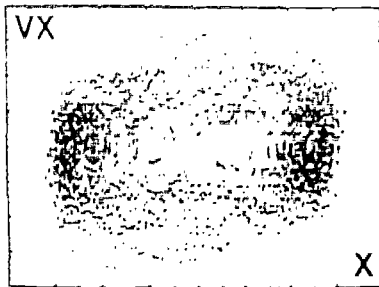
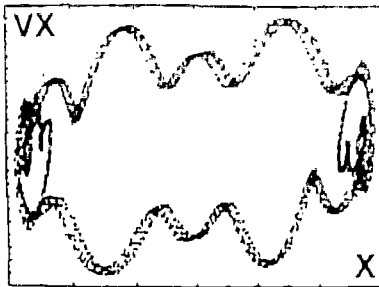
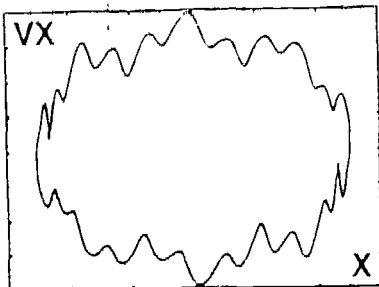


Figure 3 Plan de phase  
(a)  $U/U_c$  1.2 (b)  $U/U_c$  3. (c)  $U/U_c$  4.

(a)

(b)

(c)

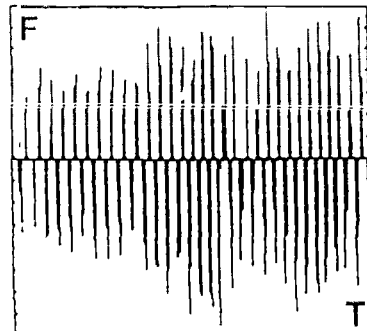
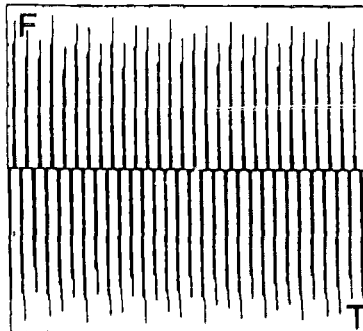
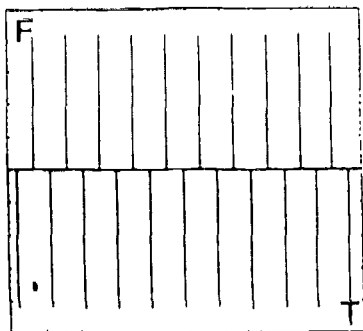


Figure 4 Forces de choc fonction du temps  
(a)  $U/U_c$  1.2 (b)  $U/U_c$  3. (c)  $U/U_c$  4.

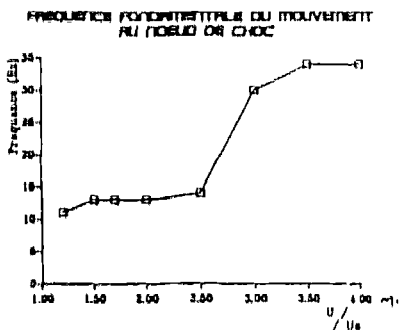


Figure 5

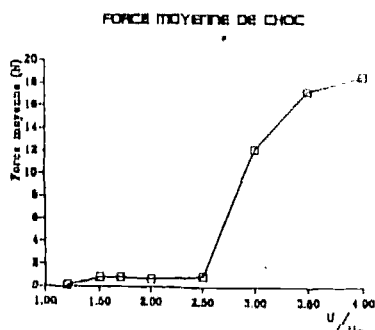


Figure 6

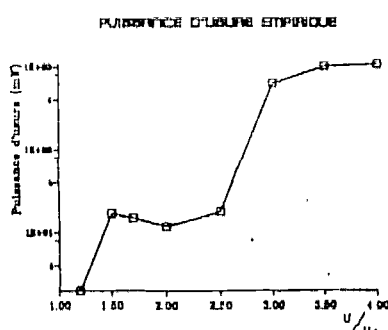


Figure 7