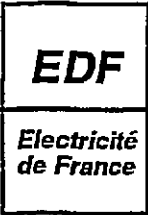


IPN
SID



Direction des Etudes et Recherches

SERVICE ENSEMBLES DE PRODUCTION
Département Surveillance Diagnostic Maintenance

Juillet 1994

GERARDIN J.P.
GERMAIN J.L.
NIO J.C.

**SONDE DE DETECTION DU DENTING DES
TUBES DE GENERATEURS DE VAPEUR REP**

***PROBE FOR DETECTION OF DENTING IN PWR
STEAM GENERATOR TUBES***

Pages : 00022

95NB00032

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

© Copyright EDF 1995

ISSN 1161-0611

SYNTHÈSE :

Dans les générateurs de vapeur REP à plaques entretoises non quadrifoliées, des dépôts d'oxydes peuvent provoquer l'encastrement, puis la déformation d'un tube (phénomène de "denting"). Cet encastrement modifie le comportement vibratoire des tubes et peut conduire à des fissurations par fatigue du tube. Une telle fissuration peut aussi être aggravée en cas de défaut de montage des barres anti-vibratoires qui maintiennent la partie cintrée des tubes.

Pour prévenir ce type d'incident et effectuer une maintenance préventive conditionnelle efficace de ses GV, EDF s'est engagé dans l'étude et le développement d'une sonde de détection de ce type de phénomènes. Les études ont démarré en 1990 et ont conduit à la réalisation d'un premier prototype de sonde. Le principe de fonctionnement de la sonde consiste à mettre le cintre en vibration et à rechercher les modes propres de résonance du tube. Des mesures de fréquence, d'amplitude et le calcul de l'amortissement permettent de caractériser le comportement mécanique du cintre. Le paramètre le plus important est l'amortissement, dont la valeur doit être suffisamment importante pour éviter que le tube ne subisse des amplitudes vibratoires importantes en fonctionnement.

La sonde actuelle est composée de trois modules reliés entre eux par une gaine permettant la circulation dans les tubes et le passage dans les cintres de faible rayon de courbure. Le premier module permet d'exciter le tube à une fréquence ajustable par l'opérateur, les deux autres modules permettent des mesures d'accélération, de part et d'autre de la plaque entretoise supérieure. Une procédure spécifique permet le positionnement précis de la sonde dans le cintre, à la position optimale permettant d'obtenir une bonne sensibilité de mesure, quel que soit le mode vibratoire du cintre excité par la sonde. La sonde est associée à un dispositif mécanique permettant l'introduction et le retrait dans un tube, à un coffret d'alimentation et à un micro-ordinateur pour l'acquisition et le traitement des mesures.

De nombreux essais ont été réalisés avec une première version du prototype de la sonde, sur maquette en hall d'essais et sur un des générateurs de vapeur déposés du site de Dampierre. Ils ont permis de vérifier le principe de fonctionnement, de mettre au point le procédé, de mettre à jour certains problèmes mécaniques de conception de la sonde et de disposer de premières indications sur le comportement vibratoire réel des cintres d'un GV.

Ils ont permis l'écriture du cahier des charges d'une sonde industrielle. Suite à un appel d'offres et au choix d'un industriel, la réalisation d'un nouveau modèle de sonde a été initialisée en 1993. Sa livraison a eu lieu en 93 et les essais ont commencé en 1994.

J.P. Gérardin
J.L. Germain
Electricité de France. Etudes et Recherches
6, quai Watier
F78400 Chatou (FRANCE)

J.C. Nio
Electricité de France,
Groupe des Laboratoires
21, allée privée. Carrefour Pleyel
F93206 Saint Denis (FRANCE)

EXECUTIVE SUMMARY :

In certain types of PWR steam generator, oxide deposits can lead to embedding, and subsequently to deformation of a tube (the phenomenon of "denting"). Such embedding changes the vibratory behavior of the tubes and can result in fatigue cracking. This type of cracking can also be worsened in the event of improper assembly of the anti-vibration spacer bars supporting the U-bends.

To prevent such incidents and provide for effective preventive condition-directed maintenance of its PWR steam generators, EDF has undertaken the study and development of a probe to detect this type of phenomenon. The studies began in 1990 and led to the building of an initial prototype probe. The principle behind the probe consists in inducing vibration in the U-bend and determining the main resonance modes of the tube. Measurements of frequency and amplitude and calculation of damping enable characterization of the mechanical behavior of the U-bend. The most important parameter is damping, for which the value must be sufficiently high to ensure that the tube is not subjected to major vibratory amplitudes during operation.

The present probe is composed of three modules interlinked by tubing to permit movement in the tubes and passage through U-bends with a small radius of curvature. With the first module, the operator can excite the tube at the frequency he chooses ; the other two modules allow for measurement of acceleration on either side of the upper support plate. It is possible to position the probe very precisely in the U-bend, in the optimum position for obtaining good measurement sensitivity whatever the vibratory mode of the U-bend when excited by the probe. The probe is connected to a mechanical device controlling entry into and removal from the tube, to a power supply box and to a microcomputer for data capture and processing.

Numerous tests have been performed with the first prototype version of the probe, on a mock-up in the test area and on one of the demounted steam generators on the Dampierre site. These different tests have enabled validation of the operating principle, fine-tuning the process, pinpointing certain mechanical problems in the probe design, and obtaining the first indications as to the real vibratory behavior of U-bends on a steam generator.

On the basis of these preliminary tests, the specifications were drawn up for an industrial version of the probe. Following a call for bids and the choice of a manufacturer, work began on fabrication of a new probe model in 1993. This version was delivered at the end of 1993 and testing began in 1994.

CONTENTS

1. Introduction	4
2. Methods of characterizing embedding.....	6
2.1 U-bend vibratory modes.....	6
2.2. Influence of embedding on vibratory modes.....	7
3. Tests	7
3.1. Mock-ups of steam generator U-bends.....	7
3.2. Probe mock-ups.....	7
3.3. Chronology of tests.....	8
4. Principal tests results	9
4.1. Frequency and amplitude as parameters for characterization of embedding	9
4.2. Vibration transmitted through the tube support plate as a parameter characterizing embedding	9
4.3. Damping as a parameter for characterization of embedding	10
4.4. Problems in probe design.....	11
5. Conclusions.....	11

1. Introduction	13
2. Méthodes de caractérisation de l'encastrement.....	15
2.1. Les modes de vibration des cintres	15
2.2. Influence d'un encastrement sur les modes vibratoires.....	16
3. Présentation des essais réalisés.....	16
3.1. Les maquettes de cintres de générateur de vapeur.....	16
3.2. Les maquettes de sonde.....	17
3.3. Historique des essais	17
4. Principaux résultats obtenus avec les essais.....	18
4.1. Evaluation de la fréquence et de l'amplitude comme paramètres de caractérisation de l'encastrement	18
4.2. Evaluation des vibrations transmises à travers la plaque entretoise comme paramètre de caractérisation de l'encastrement.....	19
4.3. Evaluation de l'amortissement comme paramètre de caractérisation de l'encastrement	19
4.4. Problèmes de conception de la sonde.....	20
5. Conclusions.....	21

1. INTRODUCTION

In order to avoid wear due to high-amplitude vibration, the U-bends on the steam generators in French pressurized water reactors are maintained in place by support plates on their straight sections and by anti-vibration spacer bars on the bends (Figure 1). This design, under Westinghouse licence, is similar to that of the steam generators in many American power plants.

In the case of the first models installed, the support plates were pierced with holes to allow the tubes to pass and with others for passage of water and steam. The accumulation and expansion of oxide deposits between the support plate and the tubes can result in embedding and subsequent deformation of the tubes. This is the phenomenon of "denting". Some sixty steam generators of this type were originally installed in France.

On more recent steam generator models, the steel used for the support plates has been replaced by stainless steel, and the tube holes have a 4-leaf clover shape. This allows passage of water and prevents the accumulation of oxides.

Embedding modifies the vibratory behavior of the tubes: a rise in resonance frequency accompanied by reduced damping; it is therefore a prime site for dissipation of the vibratory energy of the tubes. For large U-bends not supported by anti-vibration spacer bars (this is the case for the U-bends in rows 7 to 10), vibratory amplitude can become considerable and the cyclic stress thus generated can cause fatigue cracking.

For example:

- a case of denting may have been one of the principal causes of the rupture of one tube on row 9 in the NORTH ANNA plant in America in 1987,
- embedding without denting, together with faulty mounting of an anti-vibration spacer bar, may similarly have been the cause of the rupture of a tube on row 14 in the MIHAMA plant in Japan in February 1992.

Early detection of embedding is therefore necessary to prevent this type of incident. EDF has undertaken the study and development of a probe for characterization of U-bend embedding on the basis of an analysis of vibratory measurements, given that:

- detection using traditional methods (eddy-current and ultrasound testing) is only possible when embedding is already too advanced;
- at the time when these studies were undertaken, there were no available industrial versions of a probe for this type of inspection.

This paper describes the different methods envisaged for characterizing embedding, the tests performed on a mock-up and a steam generator, and the main targeted characteristics of a probe for the detection of embedding.

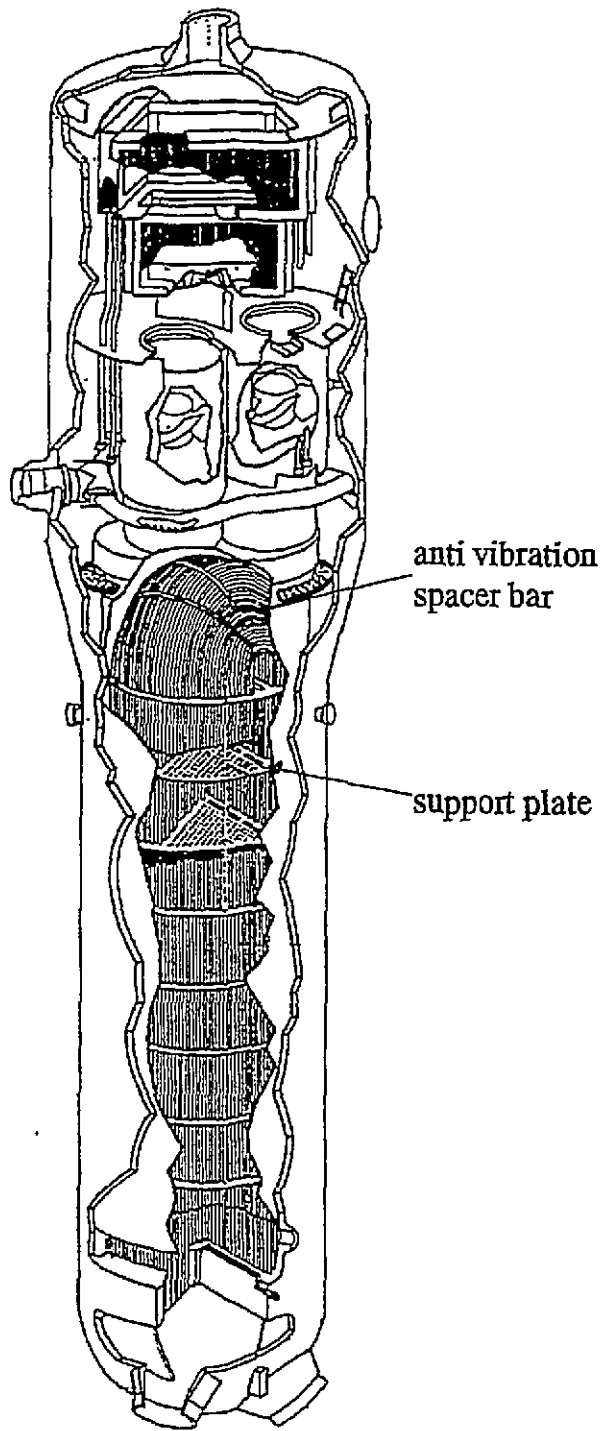


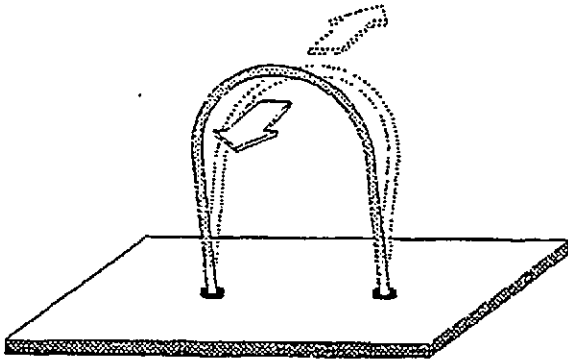
Figure 1: steam generator in a French PWR plant

2. METHODS OF CHARACTERIZING EMBEDDING

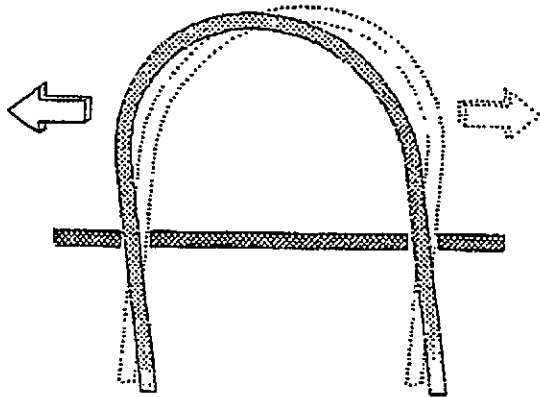
2.1 U-bend vibratory modes

In the two incidents at NORTH ANNA and MIHAMA, rupture occurred on the U-bends on the heat exchanger. We are therefore first studying this part of the tubes, which is subject to possible vibratory crises in the event of embedding in the absence of anti-vibration spacer bars.

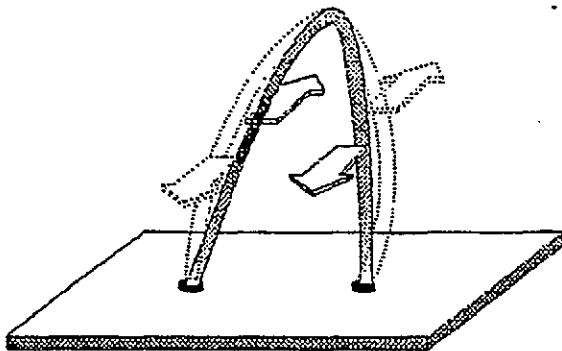
If a U-bend is caused to vibrate at increasing frequencies, the following three vibration modes will be observed:



- the first mode in which the entire U-bend is excited by vibration in a direction perpendicular to its surface plane (Figure 2);



- a second mode in which the U-bend is excited by vibration parallel to its surface plane (Figure 3);



- a third mode in which each leg of the U-bend is excited by vibration perpendicular to the plane of the U-bend. Each leg moves in a direction opposite to that of the other leg (Figure 4).

We can see that, depending on the vibratory mode, the middle of the U-bend may be either a vibration antinode or a node.

2.2. Influence of embedding on vibratory modes

For a U-bend in mechanical resonance, increased embedding at the base of the tube results in:

- a rise in the natural frequency of each vibratory mode.
- a decrease in damping, which results in an increase in U-bend vibration amplitudes.
- a drop in the vibratory energy transmitted through the tube support plate to other parts of the tube.

We therefore have at least four parameters for characterization of embedding on a U-bend vibrating in one of these three resonance modes: frequency, damping, amplitude and the energy transmitted through the tube support plate.

The pertinence of these parameters was evaluated during a number of tests performed from 1990 to 1993 on mock-ups and on a demounted SG at the EDF Dampierre plant.

3. TESTS

3.1. Mock-ups of steam generator U-bends

Three facilities were used for experimental studies on the vibratory behavior of the tubes and the behavior of the prototype probes:

- the CEA (French Atomic Energy Commission) CLOTAIRE steam generator mock-up, on the CADARACHE site.
- a specific mock-up (called mock-up M1), comprising a tube from row 7 and one from row 11 installed vertically and supported by eight pierced metal plates simulating the support plates. Different devices were used to simulate variable embedding on the last tube support plate, near the bend. This mock-up is also installed at the CEA Cadarache site.
- a demounted steam generator in the Dampierre plant. This is one of the three steam generators which were changed on this site in 1990. It serves for the purposes of testing numerous methods of inspecting steam generators. A hydraulic rolling tool was specially designed to create embedding on the last support plate.

3.2. Probe mock-ups

EDF had a first experimental probe model built in 1991, followed by an industrial version at the end of 1993, in order to test the feasibility of detecting embedding of tubes.

The fundamental design of the probes is the same:

- an exciter module comprising a mechanical exciter, whose frequency can be adjusted between 0 and 250 Hz, and a system for anchoring it on the tube.
- two modules to measure vibration frequency, each of which is fitted with accelerometers and a system for anchoring it on the tube.
- tubing which mechanically and electrically interlinks the different modules.
- a power supply box for the different modules, which also enables driving of the exciter and conditioning of accelerometer signals.

It was necessary to optimize the relative position of the three modules and determine the optimum measuring position of the probe in order to induce the three vibratory modes correctly on the U-bend and to measure the amplitudes correctly on either side of the tube support plate.

Acceleration due to gravity is used to position the probe precisely in the U-bend and find the exact axis of measurement of the the accelerometers, as it is difficult to maintain full control over the length introduced into the tube and the twisting of the probe as it penetrates.

The probe is connected to a mechanical device controlling entry into and removal from the tube, as well as to a power supply box and to a microcomputer for data capture and processing.

Once the probe is positioned in the U-bend, the operator controls the anchoring of the modules, then explores the range of excitation frequencies so as to catch the different resonance modes of the U-bend. After the accelerometer signals corresponding to these modes are recorded, they are processed to calculate the desired parameters.

3.3. Chronology of tests

The first tests were performed in 1990 on the CLOTAIRE test loop. They confirmed that the four parameters (frequency and amplitude of the three vibration modes, rate of transmission of vibrations through the support plate, and damping rate) were indeed influenced by embedding of the tubes.

In 1991, the first probe mock-up was industrially built on the basis of EDF specifications.

This probe was tested in 1992 on the M1 mock-up, primarily to analyse the electric and mechanical problems posed by this type of probe: functioning of the exciter and accelerometers, ease of entry into and removal from the tube, effective anchoring, transmission of vibration by tubing, etc.

Other tests were carried out in 1992 and 1993 on the same mock-up, enabling the fine-tuning of the probe command and choosing of the most relevant monitoring parameters.

Tests at the end of 1992, using this probe on the demounted DAMPIERRE SG, helped in understanding the difficulties of probe command under real conditions.

The specifications for an industrial version of a prototype probe were drawn up at the beginning of 1993. This version was delivered at the end of the year and will be tested in 1994.

4. PRINCIPAL TESTS RESULTS

The tests contributed to an evaluation of the pertinence of the parameters characterizing embedding and to a better understanding of the engineering problems linked to the design and use of this type of probe.

4.1. Frequency and amplitude as parameters for characterization of embedding

Table 1 presents the experimental results of measurement of resonance frequency and amplitude on an R11 U-bend, obtained using one of the prototype probe models. Readings were taken with no embedding ("clear/clear" tube-plate link), with a single leg of the U-bend embedded ("clear/embedded"), and with both legs embedded ("embedded/embedded").

Table 1: Measurements of resonance frequency and amplitude for an R11 U-bend, depending on the nature of the embedding.

Vibration mode	Mode 1		Mode 2		Mode 3	
	Frequency	Amplitude	Frequency	Amplitude	Frequency	Amplitude
clear/clear	27 Hz	0,11 G	104 Hz	0,7 G	116 Hz	1,7 G
clear/embedded	38 Hz	0,13 G	109 Hz	1,0 G	128 Hz	1,7 G
embedded/embedded	52 Hz	0,5 G	119 Hz	2,7 G	145 Hz	5,1 G

These results do indicate the expected phenomenon; a rise both in the characteristic frequencies of the first three vibration modes and in vibration amplitude in cases of embedding.

Nevertheless, measurement of resonance amplitude has the disadvantage of being dependent on excitation energy and on the position of the probe in the U-bend.

4.2. Vibration transmitted through the tube support plate as a parameter characterizing embedding

Figure 5 shows the difference in the spectrum of accelerations measured in the part of the tube below the support plate, before the U-bend, depending on whether the two legs of the U-bend are clear or embedded in the support plate.

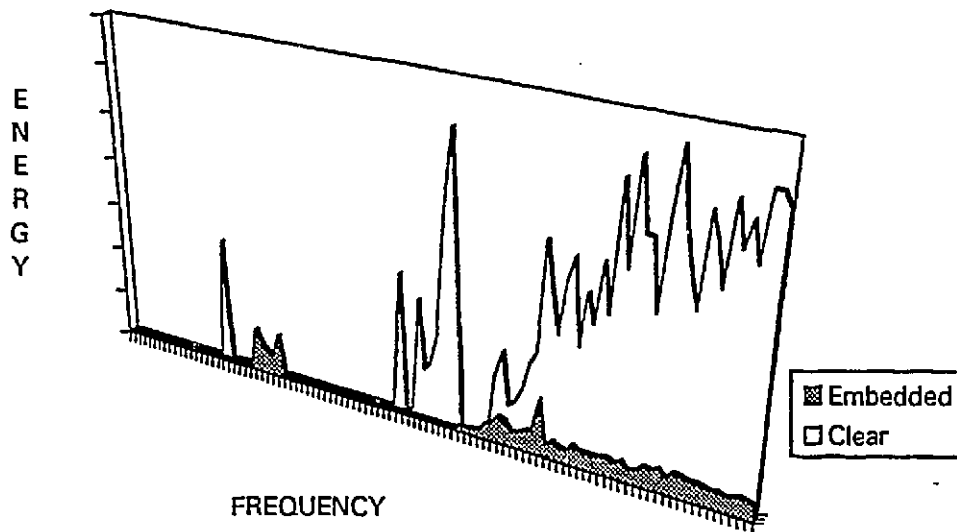


Figure 5: Transmitted energy diminishes in the case of embedding.

The influence of embedding is clear. However, it appears difficult to characterize the phenomenon by means of a calculated mathematical parameter based on spectrum shape and to draw conclusions regarding the phenomenon which most directly interests us, that of decreased damping.

4.3. Damping as a parameter for characterization of embedding

For this type of measurement, the U-bend is excited at a frequency close to one of its resonance frequencies; one then suddenly ceases the excitation and measures the curve of decreasing amplitude to calculate the damping coefficient.

Table 2 gives frequency and damping readings using the first probe mock-up. The figures in parentheses correspond to measurements without the probe, using external accelerometers, taken to estimate the influence of the probe on damping.

Table 2: Frequencies and damping coefficients on a U-bend mock-up.

Vibration mode	Mode 1		Mode 2		Mode 3	
	Frequency	Damping	Frequency	Damping	Frequency	Damping
clear/clear	not measurable	not measurable	108,7 Hz (112,5)	8,5 10 ⁻³ (2,8 10 ⁻³)	123,7 Hz (136,2)	6,7 10 ⁻³ (7,0 10 ⁻³)
clear/embedded	40 Hz (38,7)	20 10 ⁻³ (18 10 ⁻³)	109,7 Hz (112,5)	14 10 ⁻³ (5,7 10 ⁻³)	132,5 Hz (141,2)	11,7 10 ⁻³ (25 10 ⁻³)
embedded/embedded	48,7 Hz (52,5)	8,4 10 ⁻³ (3,0 10 ⁻³)	113,7 Hz (125)	2,8 10 ⁻³ (2,2 10 ⁻³)	136 Hz (150)	7,0 10 ⁻³ (8,7 10 ⁻³)

In general, one indeed notes a decrease in damping when the U-bend is embedded at both extremities. There appear to be certain inconsistencies in the results, however, particularly for mode 3.

Measurement of damping has the advantage of being directly related to the phenomenon we are attempting to detect. There are nonetheless certain drawbacks:

- the presence of the probe has a non-negligible influence on the measured parameter. It will therefore be necessary to design a highly supple probe and to minimize this influence.
- calculation of damping on the sole basis of an analysis of the exponential decrease in amplitude appears too imprecise. It must be complemented by a more detailed analysis of the U-bend vibration modes.

4.4. Problems in probe design

The probe must fit several criteria which are difficult to respect simultaneously:

- miniaturization of the three modules
- the means of anchoring the modules on the tube must be strong and therefore capable of transmitting vibrations well; it must not mark the tube; it must be controllable at a distance and reliable.
- it must be possible to introduce the probe into the tube and, above all, to remove it easily, without risk of blockage.
- the probe must have no more than a negligible influence on the measured parameters, particularly on damping, which is a sensitive parameter.

The probe built at the end of 1993 should meet these criteria.

5. CONCLUSIONS

Risks of cracking on SG tubes due to embedding by oxide deposits on the tube support plates have prompted EDF to study a prototype probe for characterization of embedding.

Four parameters were studied which help in analysing the vibratory behavior of an embedded U-bend excited on one of its resonance modes: frequency, damping, amplitude and energy transmitted through the tube support plate.

Of the four parameters studied, resonance frequency and damping coefficient appear to us today to be the most pertinent parameters for characterization of U-bend embedding.

The damping coefficient appears the most helpful of the two, as it constitutes a direct measurement of the phenomenon to be detected.

An industrial version of a prototype probe was built at the end of 1993, following the preliminary studies under way since 1990. This prototype will be evaluated in 1994, in particular during tests under industrial conditions on the demounted steam generator in the DAMPIERRE plant.

1. INTRODUCTION

Dans les générateurs de vapeur des centrales à eau pressurisée françaises, afin d'éviter les dégradations dues aux vibrations de forte amplitude, les tubes en U sont maintenus dans les parties droites par des plaques entretoises et dans les parties cintrées par des barres anti-vibratoires (figure 1). Cette conception, issue des licences passées avec Westinghouse, est analogue à celle des générateurs de vapeur de nombreuses centrales américaines.

Dans les premiers modèles installés, les plaques étaient percées de trous pour le passage des tubes et d'autres trous pour le passage de l'eau et de la vapeur. L'accumulation puis le gonflement de dépôts d'oxydes entre la plaque entretoise et les tubes peuvent entraîner l'encastrement puis la déformation des tubes, c'est le phénomène de denting. Environ une soixantaine de générateurs de vapeur de cette conception ont été installés en France.

Dans les modèles plus récents de générateurs de vapeur, l'acier utilisé pour les plaques entretoises a été remplacé par de l'acier inoxydable et les trous de passage des tubes ont une forme de trèfle à quatre feuilles. Ils permettent le passage de l'eau et évitent le phénomène d'accumulation d'oxydes.

Un encastrement modifie le comportement vibratoire des tubes : hausse de la fréquence de résonance, chute de l'amortissement, et devient le lieu privilégié de la dissipation de l'énergie de vibration des tubes. Pour les grands cintres qui ne sont pas maintenus par des barres anti-vibratoires (c'est le cas des cintres des lignes 7 à 10), l'amplitude des vibrations peut devenir importante et les contraintes cycliques ainsi engendrées peuvent être à l'origine d'une fissuration par fatigue.

Ainsi :

- un phénomène de denting serait l'une des principales causes de la rupture d'un tube de ligne 9 sur la centrale américaine de NORTH ANNA en 1987.
- un encastrement sans denting associé à un défaut de montage de barre anti-vibratoire seraient également à l'origine de la rupture d'un tube de ligne 14 sur la centrale japonaise de MIHAMA en février 1992.

Une détection précoce de l'encastrement s'avère donc nécessaire pour prévenir ce type d'incident. EDF s'est engagé dans l'étude et le développement d'une sonde de caractérisation de l'encastrement des cintres, basée sur l'analyse de mesures vibratoires car :

- une détection par les contrôles classiques (courants de Foucault et ultrasons) ne serait possible qu'à partir d'un état trop avancé de l'encastrement.
- à l'époque où ces études ont été initiées, on ne disposait pas sur le marché de sonde industrielle pour réaliser ce type de contrôle.

Ce document décrit les diverses méthodes de caractérisation de l'encastrement qui ont été envisagées, les essais réalisés sur maquette et sur générateur de vapeur ainsi que les principales caractéristiques attendues d'une sonde de détection de l'encastrement.

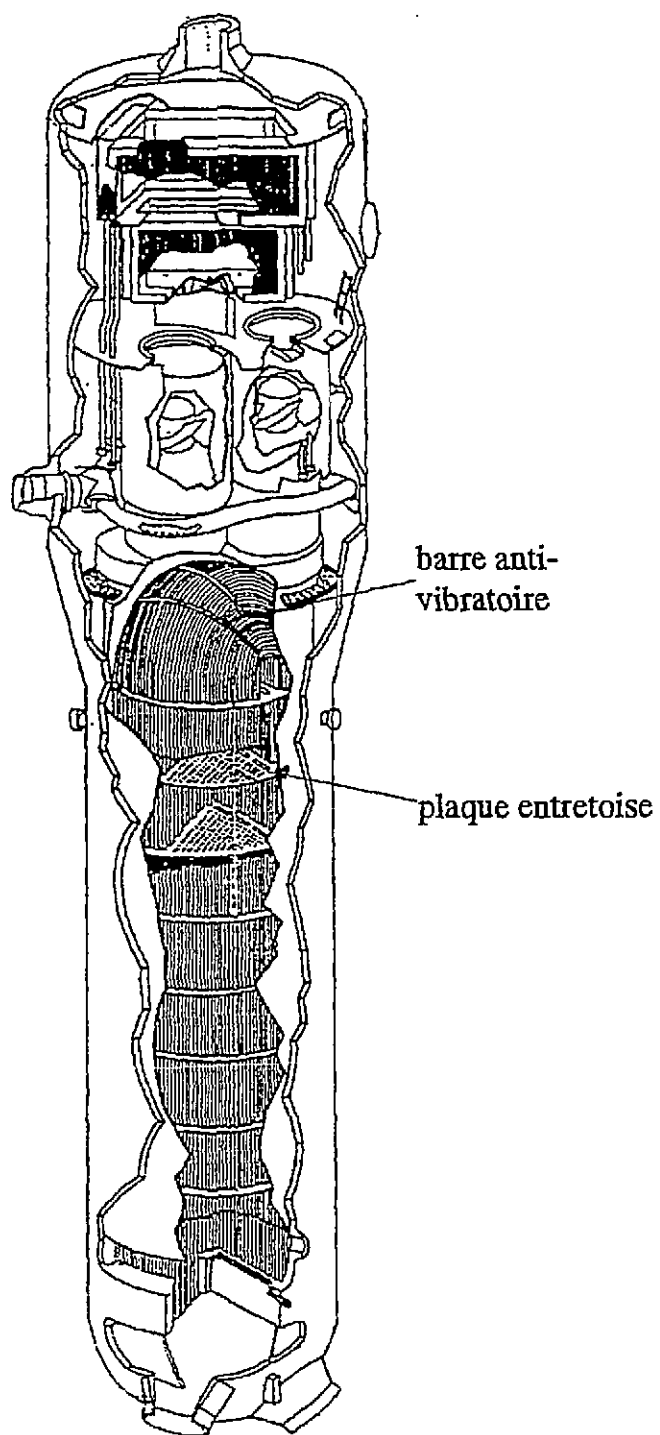


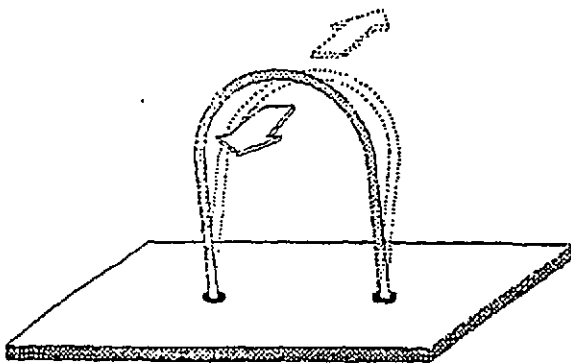
Figure 1: générateur de vapeur d'une centrale REP française

2. METHODES DE CARACTERISATION DE L'ENCASTREMENT

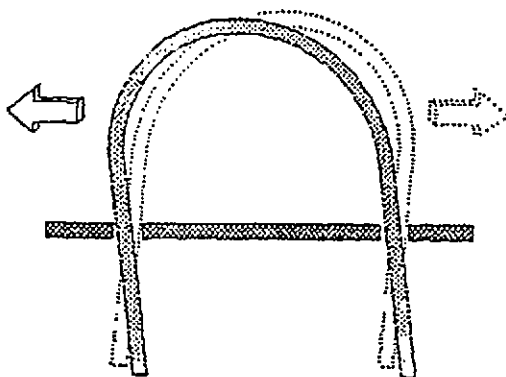
2.1. Les modes de vibration des cintres

Dans les deux incidents de NORTH ANNA et de MIHAMA, la rupture a eu lieu dans la partie supérieure des tubes en U de l'échangeur. On s'intéresse donc en premier à cette partie cintrée des tubes, qui est sujette à d'éventuelles crises vibratoires en cas d'encastrement et d'absence de barre anti-vibratoire.

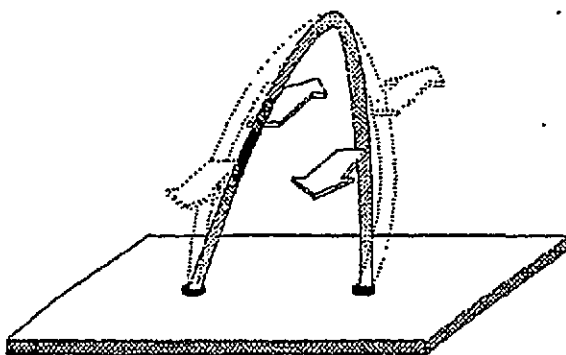
Si un cintre est mis en vibration, par fréquences croissantes, on observera successivement les trois modes de vibration suivants (figure 2) :



- un premier mode où l'ensemble du cintre est animé d'un mouvement de vibration dans une direction perpendiculaire à son plan (figure 2).



- un deuxième mode où le cintre est animé d'un mouvement de vibration dans une direction parallèle à son plan (Figure 3).



- un troisième mode où chaque jambe du cintre est animée d'un mouvement de vibration dans une direction perpendiculaire au plan du cintre. Le sens de déplacement d'une jambe est opposé à celui de l'autre jambe (Figure 4).

On voit que selon les modes, le milieu du cintre peut être soit un ventre, soit un noeud de vibration.

2.2. Influence d'un encastrement sur les modes vibratoires

Pour un cintre en résonance mécanique, une augmentation de l'encastrement en pied de tube entraîne :

- une augmentation de la fréquence propre de chaque mode de vibration.
- une diminution de l'amortissement qui se traduit par une augmentation des amplitudes de vibration du cintre
- une diminution de l'énergie vibratoire transmise à travers la plaque entretoise vers les autres parties du tube.

On dispose donc a priori d'au moins quatre paramètres pour caractériser l'encastrement d'un cintre en vibration sur un mode de résonance : la fréquence, l'amortissement, l'amplitude et l'énergie transmise au travers de la plaque entretoise.

La pertinence de ces paramètres a été évaluée au cours de nombreux essais réalisés de 1990 à 1993 sur des maquettes et sur un GV déposé de la centrale de Dampierre.

3. PRESENTATION DES ESSAIS REALISES

3.1. Les maquettes de cintres de générateur de vapeur

Trois moyens d'essais ont été utilisés pour étudier expérimentalement le comportement vibratoire des tubes et le comportement des sondes prototypes :

- la maquette de générateur de vapeur CLOTAIRE du CEA (Commissariat à l'Energie Atomique), sur le site de CADARACHE.
- une maquette spécifique (appelée maquette M1) constituée d'un tube de ligne 7 et d'un tube de ligne 11 installés verticalement et soutenus par huit plaques métalliques percées simulant les plaques entretoises. Divers dispositifs ont été utilisés pour simuler un encastrement variable au niveau de la dernière plaque entretoise, près de la partie cintrée. Cette maquette est aussi installée au CEA à Cadarache.
- un générateur de vapeur déposé de la centrale de Dampierre. Celui-ci est l'un des trois générateurs de vapeur qui ont été changés en 1990 sur ce site. Il sert de champ d'expérience à de nombreuses méthodes d'inspection des générateurs de vapeur. Un outil de dudgeonnage hydraulique a été spécialement étudié afin de créer des encastrements au niveau de la dernière plaque entretoise.

3.2. Les maquettes de sonde

EDF a fait réaliser un premier modèle de sonde expérimentale en 1991, puis un prototype industriel fin 1993, afin d'évaluer la faisabilité de la détection de l'encastrement des tubes.

La conception générale des sondes est la même :

- un module excitateur comportant un excitateur mécanique ajustable en fréquence de 0 à 250 Hz et un moyen d'ancrage sur le tube.
- deux modules de mesure des fréquences de vibration comportant chacun des accéléromètres et un moyen d'ancrage sur le tube.
- une gaine reliant mécaniquement et électriquement les différents modules.
- un coffret d'alimentation électrique des différents modules, permettant aussi le pilotage de l'excitateur et le conditionnement des signaux des accéléromètres.

La position relative des trois modules ainsi que la position optimale de mesure de la sonde ont dû être optimisées afin de pouvoir exciter convenablement les trois modes de vibration du cintre, et mesurer correctement les amplitudes de part et d'autre de la plaque entretoise.

L'accélération de la pesanteur est utilisée pour positionner précisément la sonde dans le cintre et repérer la position exacte de l'axe de mesure des accéléromètres, car il est difficile de contrôler précisément la longueur introduite et la torsion de la sonde lors de sa pénétration dans le tube.

La sonde est associée à un dispositif mécanique permettant l'introduction et le retrait dans un tube, à un coffret d'alimentation et à un micro-ordinateur pour l'acquisition et le traitement des données.

Une fois la sonde positionnée dans un cintre, l'opérateur commande l'ancrage des modules dans le tube puis explore la gamme des fréquences d'excitation afin d'accrocher les différents modes de résonance du cintre. Après enregistrement des signaux des accéléromètres correspondant à ces modes, des traitements sont réalisés pour calculer les paramètres recherchés.

3.3. Historique des essais

Les premiers essais ont été réalisés en 1990 sur la boucle CLOTAIRE. Ils ont confirmé que les quatre paramètres : fréquence et amplitude des modes de vibration, taux de transmission des vibrations au travers de la plaque entretoise et taux d'amortissement, étaient bien influencés par l'encastrement des tubes.

En 1991, la première maquette de sonde a été réalisée par un industriel à partir d'un cahier des charges écrit par EDF.

Cette sonde a été testée en 1992 sur la maquette M1, principalement pour analyser les problèmes électriques et mécaniques posés par ce type de sonde : fonctionnement de l'excitateur et des accéléromètres, facilité d'introduction et de retrait, efficacité de l'ancrage, transmission des vibrations par la gaine, etc..

D'autres essais réalisés en 1992 et 1993 sur cette même maquette ont permis de mettre au point la méthode de contrôle et de choisir les paramètres de surveillance les plus pertinents.

Des essais effectués fin 1992 sur le GV déposé de DAMPIERRE, avec cette sonde prototype, ont permis d'appréhender les difficultés d'un contrôle en conditions réelles.

Le cahier des charges d'un prototype de sonde industrielle a été rédigé début 1993. Cette nouvelle sonde a été livrée fin 1993 et sera essayée en 1994.

4. PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS AVEC LES ESSAIS

Les essais ont permis d'évaluer la pertinence des paramètres caractérisant l'encastrement et de mieux connaître les problèmes d'ingénierie liés à conception et à l'utilisation d'une sonde de ce type.

4.1. Evaluation de la fréquence et de l'amplitude comme paramètres de caractérisation de l'encastrement

Le tableau 1 présente des résultats expérimentaux de mesure de la fréquence et de l'amplitude de résonance d'un cintre R11, effectués avec un des modèles de sonde prototype. Les mesures ont été faites sans encastrement (liaison tube plaque du type "appuyé/appuyé"), avec une seule jambe du cintre encastree ("appuyé/encastree") et avec les deux jambes encastrees ("encastree/encastree").

Mode de vibration	Mode 1		Mode 2		Mode 3	
	Fréquence	Amplitude	Fréquence	Amplitude	Fréquence	Amplitude
appuyé/appuyé	27 Hz	0,11 G	104 Hz	0,7 G	116 Hz	1,7 G
appuyé/encastree	38 Hz	0,13 G	109 Hz	1,0 G	128 Hz	1,7 G
encastree/encastree	52 Hz	0,5 G	119 Hz	2,7 G	145 Hz	5,1 G

Tableau 1 : résultats des mesures des fréquences et des amplitudes de résonance d'un cintre R11 selon le type d'encastrement réalisé.

On constate donc bien le phénomène attendu, à savoir une augmentation des fréquences caractéristiques des trois premiers modes de vibration des cintres et des amplitudes de vibration lorsque l'encastrement du cintre est réalisé.

La mesure de l'amplitude à la résonance présente toutefois l'inconvénient d'être dépendante de l'énergie d'excitation et de la position de la sonde dans le cintre.

4.2. Evaluation des vibrations transmises à travers la plaque entretoise comme paramètre de caractérisation de l'encastrement

La figure 5 montre la différence d'aspect du spectre des accélérations mesurées dans la partie du tube située sous la plaque entretoise, avant le cintre, selon que les deux jambes du cintre sont appuyées ou encastrées dans la plaque entretoise.

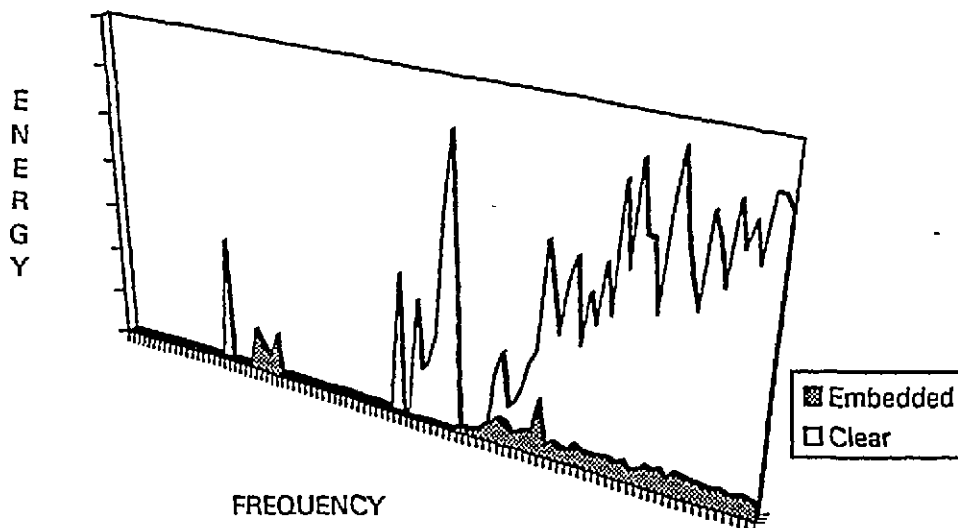


Figure 5 : Energie transmise au travers de la plaque entretoise. Le spectre de transmission est moins énergétique en cas d'encastrement.

L'influence de l'encastrement est nette, cependant la caractérisation du phénomène par le calcul d'un paramètre mathématique basé sur la forme des spectres paraît difficile à réaliser et à relier au phénomène qui nous intéresse directement, c'est à dire la perte d'amortissement.

4.3. Evaluation de l'amortissement comme paramètre de caractérisation de l'encastrement

Pour faire ces mesures, on excite le cintre à une fréquence proche d'une de ses fréquences de résonance, on arrête brutalement l'excitation et on mesure la courbe de décroissance de l'amplitude afin de calculer le coefficient d'amortissement.

Le tableau 2 présente les mesures de fréquence et d'amortissement réalisées avec la première maquette de sonde. Les mesures entre parenthèses ont été effectuées sans sonde, à l'aide d'accéléromètres externes, afin d'estimer l'influence de la sonde sur l'amortissement.

Mode de vibration	Mode 1		Mode 2		Mode 3	
	Fréquence	Amortissement	Fréquence	Amortissement	Fréquence	Amortissement
appuyé/appuyé	Non mesurable	Non mesurable	108,7 Hz (112,5)	8,5 10 ⁻³ (2,8 10 ⁻³)	123,7 Hz (136,2)	6,7 10 ⁻³ (7,0 10 ⁻³)
appuyé/encasté	40 Hz (38,7)	20 10 ⁻³ (18 10 ⁻³)	109,7 Hz (112,5)	14 10 ⁻³ (5,7 10 ⁻³)	132,5 Hz (141,2)	11,7 10 ⁻³ (25 10 ⁻³)
encasté/encasté	48,7 Hz (52,5)	8,4 10 ⁻³ (3,0 10 ⁻³)	113,7 Hz (125)	2,8 10 ⁻³ (2,2 10 ⁻³)	136 Hz (150)	7,0 10 ⁻³ (8,7 10 ⁻³)

Tableau 2 : Mesures des fréquences et des coefficients d'amortissement sur une maquette de cintre.

On constate bien en général une diminution de l'amortissement lorsque le cintre est encasté à ses deux extrémités. Toutefois quelques incohérences apparaissent dans les résultats notamment pour le mode 3.

La mesure d'amortissement apparaît intéressante car elle est directement liée au phénomène que l'on cherche à détecter. Elle présente cependant plusieurs inconvénients :

- la présence de la sonde modifie de manière non négligeable le paramètre mesuré. Il faut donc concevoir une sonde très souple pour limiter cet inconvénient.
- le calcul de l'amortissement à partir de la seule analyse de la décroissance exponentielle de l'amplitude apparaît trop imprécis. Il faut l'améliorer par une analyse plus fine des modes de vibration du cintre.

4.4. Problèmes de conception de la sonde

La sonde doit répondre à plusieurs caractéristiques difficiles à respecter simultanément :

- la miniaturisation des trois modules
- le moyen d'ancrage des modules sur le tube doit être puissant pour bien transmettre les vibrations, il ne doit pas marquer le tube, il doit être commandable à distance et fiable.
- la sonde doit pouvoir être introduite et surtout retirée facilement sans risque de blocage dans le tube.
- la sonde doit modifier de manière négligeable les paramètres mesurés, notamment l'amortissement apparaît comme un paramètre sensible.

Le modèle de sonde réalisé fin 93 devrait répondre à ces caractéristiques.

5. CONCLUSIONS

Les risques de fissuration de tubes de GV par suite d'encastrement dû aux dépôts d'oxydes dans les plaques entretoises ont conduit EDF à étudier un prototype de sonde de caractérisation de cet encastrement.

Quatre paramètres permettant l'analyse du comportement vibratoire d'un cintre encasté, excité sur ses modes de résonance, ont été étudiés : la fréquence, l'amortissement, l'amplitude et l'énergie transmise au travers de la plaque entretoise.

Des quatre paramètres étudiés, la fréquence de résonance et le coefficient d'amortissement nous apparaissent aujourd'hui comme les paramètres les plus pertinents pour caractériser l'encastrement d'un cintre.

Le coefficient d'amortissement nous paraît le plus intéressant des deux car il constitue une mesure directe du phénomène recherché.

Un prototype de sonde industrielle a été fabriqué fin 1993, suite aux études préliminaires réalisées depuis 1990. Ce prototype sera évalué en 1994, notamment à l'aide d'essais en conditions industrielles sur le générateur de vapeur déposé de la centrale de DAMPIERRE.



*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 détachable grâce à la microperforation sur le coté droit.

Référence de la demande : **F528215**
Origine : **CATALOGUE DES NOTES DER**

Votre commande :

Numéro du document : **95NB00032**

Titre : **SONDE DE DETECTION DU DENTING DES TUBES DE GENERATEURS DE VAPEUR
REP**

Auteurs : **GERARDIN J.P./GERMAIN J.L./NIO J.C.**

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

Référence du document : **SANS**

Nombre de pages : **0023**

Nombre d'exemplaires : **001**

Support : **P**