

# Analyse probabiliste des incidents survenus sur les tubes de générateur de vapeur des tranches françaises REP 900 MW en exploitation et proposition d'une méthode d'inspection du faisceau tubulaire

P.Pitner

*Direction des Etudes et Recherches, St.Denis, France*

**E.D.F. - SEPTEN**

**DIVISION  
GESTION ET INFORMATION  
TECHNIQUES**

12, 14, avenue Dutriévoz  
69628 VILLEURBANNE Cedex  
Téléphone : (7) 894.44.44

Enregistré le **08 SEP. 1985**

## 1 INTRODUCTION

Les défaillances survenant sur les tubes de Générateurs de Vapeur (G.V.) constituent tant en France qu'à l'étranger une des principales sources d'indisponibilité des centrales nucléaires.

A titre d'exemple, en France où l'âge moyen du parc est de 2.8 ans, on a constaté que les G.V. sont responsables de 0.3 arrêt par tranche et par an. Ceci correspond à une indisponibilité annuelle, généralement programmée, de 3 %. Pour les centrales PWR Westinghouse, où l'âge moyen du parc est plus important et de 5.6 ans, on a constaté que les G.V. sont responsables de 0.6 arrêt par tranche et par an, ce qui implique une indisponibilité de 12 %.

Ces arrêts, coûteux en temps et en homme-rem, sont généralement dus à des fuites entre les circuits primaires et secondaires occasionnées par des fissurations de tubes.

En France, les fissures longitudinales dans la zone de Transition de Dudgeonnage (ZTD) représentent la majorité des fissurations observées. On rencontre également des fissurations par corrosion sous tension dans les petits cintres, des usures par frottement sur les barres antivibratoires (BAV), des endommagements dus à la présence de corps migrants...

Un certain nombre de modifications de conception ont donc été réalisées de manière à améliorer les comportements mécanique et thermohydraulique des G.V. et limiter ainsi les risques de corrosion et de fissuration.

Parallèlement, une analyse probabiliste établie à partir des éléments principaux du retour d'expérience du faisceau tubulaire a été développée afin d'optimiser les contrôles systématiques effectués sur les G.V. au cours de chaque visite. Cette optimisation a pour objectif de limiter les temps et coûts d'inspection, d'améliorer la disponibilité de chaque centrale et de satisfaire les impératifs de sûreté.

Les contrôles sont réalisés à l'aide de sondes à symétrie axiale utilisant les propriétés des courants de Foucault multifréquences et rentrent dans le cadre d'un programme de surveillance plus général du faisceau tubulaire : pratique du test hélium, extraction de tubes pour expertise, arrêt pour fuite confirmée, détection acoustique de corps migrants.

Cette étude se propose donc d'analyser les résultats des contrôles effectués sur les Générateurs de Vapeur en service en France depuis 1977 jusqu'en juillet 1985, et développe une méthode probabiliste d'optimisation de ces contrôles.

## 2 ANALYSE DU RETOUR D'EXPERIENCE

L'analyse du retour d'expérience d'exploitation et de contrôle de tous les Générateurs de Vapeur en service en France a été réalisée à partir de la banque de données GENVAP du service de la production thermique, du système de Recueil de Données de Fiabilité (SRDF) ainsi que du Fichier Statistiques Energétiques des centrales REP.

Celle-ci a montré qu'il est possible de partager le faisceau de tube au niveau de la plaque tubulaire en 3 ou 4 zones bien distinctes en fonction des différents types de défauts rencontrés.

Les natures de ces défauts peuvent être classées ainsi :

### 1. Usure par frottement sur les Barres Antivibratoires (Zone 2) :

les barres antivibratoires sont intercalées entre chaque nappe de tubes au droit des cintres G.V. Elles sont au nombre de deux par nappe sur les REP 900, et sont destinées à éviter une destruction du faisceau par suite d'un phénomène de résonance fluide-faisceau tubulaire.

Des usures sont constatées sur certains tubes. Elles ont pour origine la mise en vibration des cintres du faisceau tubulaire et se caractérisent par un amincissement progressif des tubes au contact avec les BAV.

### 2. Fissuration dans la Zone de transition de Dudgeonnage (Zone 2) :

les fissurations observées en France au niveau des ZTD correspondent en majorité à un phénomène de corrosion en milieu primaire en présence de contraintes de tension élevées provenant de l'opération de dudgeonnage.

Le dudgeonnage des tubes sur la plaque tubulaire a évolué au cours du temps et peuvent être classés en 3 types :

- . dudgeonnage mécanique partiel suivi d'un dudgeonnage intégral par explosif,
- . dudgeonnage mécanique intégral (DMI),
- . dudgeonnage mécanique intégral + dudgeonnage amélioré mécaniquement (DAM).

On a ainsi pu constater plusieurs manifestations du phénomène de corrosion sous tension :

- . fissures longitudinales ou inclinées de corrosion sous tension initiées soit en peau interne soit en peau externe (Fessenheim 1),
- . fissurations longitudinales intergranulaire et caractéristique d'un phénomène de corrosion sous contrainte en milieu primaire (Bugey 5),
- . réseaux de petites fissures longitudinales courtes (Dampierre 1),
- . fissuration circulaire sur les tubes présentant des dudgeonnages anormaux (DMI dépassant et diamètre des DAM trop élevé).

### 3. Fissuration dans les petits cintres (Zone 1) :

Ce type de corrosion sous tension se traduit par une fissuration initiée côté primaire et qui apparaît soit au sommet des cintres, soit au point de transition entre la zone cintrée et la zone droite du tube. Elle affecte les tubes ayant le plus petit rayon de cintrage et résulte de contraintes résiduelles de fabrication.

### 4. Corps étrangers ou corps migrants (Zone 3) :

Les dégradations résultent de chocs sur les tubes dus à des corps migrants ou de dommages réalisés au cours d'intervention.

5. "Denting" ou retrait au niveau des plaques entretoises (Zone 3) :

Le phénomène de Denting a été identifié en 1975 sur plusieurs centrales américaines. Il s'agit de striction des tubes due à une oxydation importante de l'acier des plaques entretoises dans l'interstice entre tube et plaque. Plusieurs mesures ont été prises pour lutter contre ce phénomène et aucune centrale française ne semble avoir été touchée à ce jour.

Le partage de la plaque tubulaire en différentes zones à partir des défauts rencontrés s'effectue alors ainsi :

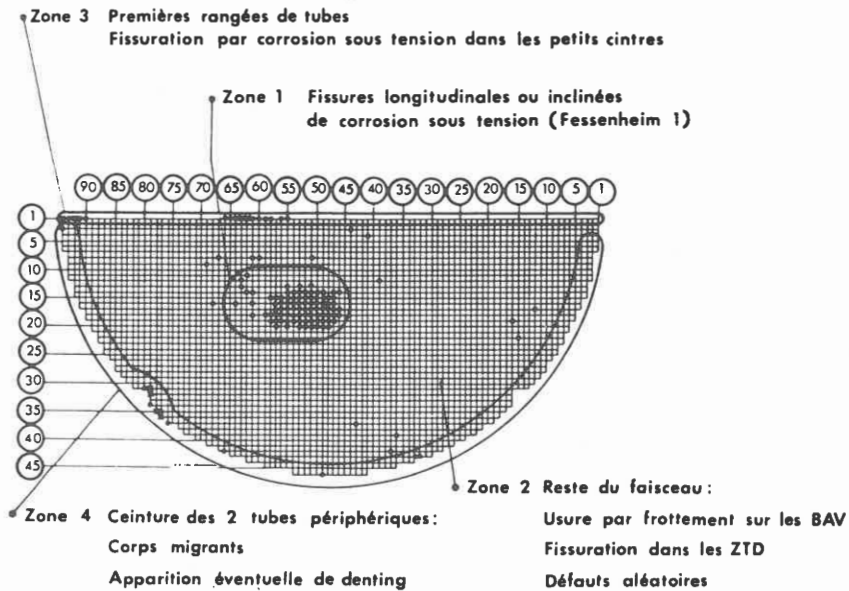


Figure 1. Partage de la plaque tubulaire

### 3 METHODOLOGIE

Le principe général proposé consiste à ne commencer le contrôle d'une zone particulière du faisceau qu'à partir du nombre d'heures de fonctionnement où cette zone est susceptible d'être atteinte par un processus de dégradation. On inspectera alors un certain pourcentage de tubes de manière à mettre en évidence l'apparition éventuelle d'un tel processus de dégradation. Le contrôle s'effectuera en cherchant à détecter, pour un taux de confiance  $\alpha$  donné, au moins un des tubes défectueux.

On s'attachera donc à définir les deux paramètres suivants :

1. Le TEMPS s'écoulant entre la mise en service du G.V. et l'instant où une zone peut être affectée par des défaillances de tubes,
2. Le NOMBRE de tubes qu'il est nécessaire d'inspecter dans cette zone pour mettre en évidence ce phénomène de dégradation avec un taux de réussite donné.

L'approche probabiliste entreprise assimilera le temps d'apparition

des défaillances dans chaque zone à des variables aléatoires ainsi que le nombre de tubes défaillants par G.V. au cours du temps.

On estimera ensuite les lois de distribution de ces variables aléatoires.

Ces lois étant connues, il sera alors possible de quantifier les deux principaux paramètres du contrôle recherchés : Temps et Nombre.

Nota : On entend par tube défaillant tout tube fuitard ou dont l'état de dégradation est tel qu'il nécessite un bouchage préventif.

#### 4 MODELE STATISTIQUE ET LOI DE DISTRIBUTION DE WEIBULL

De nombreuses études ont été entreprises pour déterminer les lois de distribution représentatives de l'évolution au cours du temps de phénomènes de corrosion sous tension. Chapouille et de Pazzis entre autres ont montré que l'étude des distributions de défaillances des tubes était très bien représentée par les lois de Weibull.

Ce modèle mathématique a l'avantage de bien coiffer un assez grand nombre de distributions de durées de vie.

Sa fonction de répartition a pour expression :

$$(1) \quad F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

où :

$\beta$  = paramètre de forme

$\gamma$  = décalage à l'origine

$\eta$  = paramètre d'échelle

la densité de probabilité  $f(t)$  est donnée par :

$$(2) \quad f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

et le taux de défaillance instantané  $\lambda(t)$  est donné par :

$$(3) \quad \lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^{\beta-1}$$

Si  $\beta < 1$ , le taux de défaillance décroît avec l'âge.

Si  $\beta = 1$ , le taux de défaillance est constant et la distribution est de type exponentielle.

Si  $\beta > 1$ , le taux de défaillance croît avec l'âge et si  $\beta$  est supérieur à trois, la distribution peut être assimilée à une loi normale.

Pour chacune des zones, on obtient ainsi les lois de distribution suivantes, lesquelles sont caractéristiques de l'évolution du nombre de tubes défaillants par G.V. en service, au cours du temps :

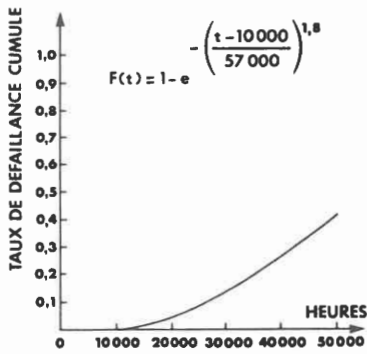


Fig. 2 ZONE 1

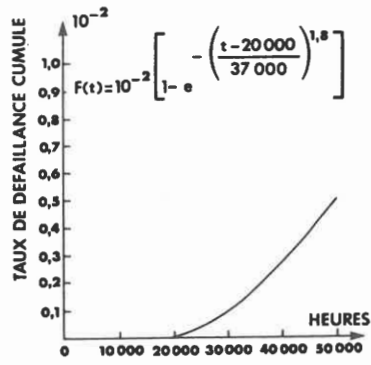


Fig. 3 ZONE 2

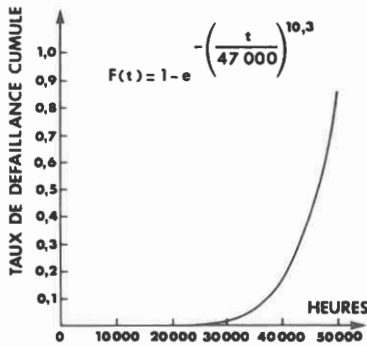


Fig. 4 ZONE 3

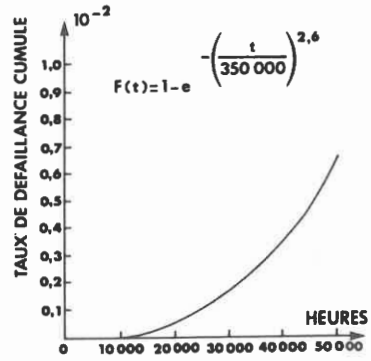


Fig. 5 ZONE 4

L'analyse de l'évolution du taux de défaillance  $\lambda(t)$  pour chaque zone en fonction de l'âge, et donné par l'équation 3, détermine le temps à partir duquel il sera nécessaire de commencer l'inspection du faisceau tubulaire dans cette zone.

#### 5 PLAN D'ECHANTILLONNAGE ET DE CONTROLE

Si :

- N est le nombre de tubes dans une zone (taille de la population),
- n est le nombre de tubes inspectés (taille de l'échantillon),
- D est le nombre de tubes défectueux,
- $\alpha$  est l'intervalle de confiance.

Comme chaque tube ne peut être contrôlé qu'une seule fois, le choix de l'échantillon correspond à un prélèvement exhaustif et sa distribution est du type hypergéométrique.

Le choix des tubes doit, autant que possible, être soumis au hasard et la probabilité de ne trouver aucun tube défectueux parmi l'échantillon s'écrit, par application du théorème des probabilités conditionnelles :

$$(4) \quad P(0) = \frac{(N-D)! (N-n)!}{(N-D-n)! N!} = \frac{C_D^0 C_{N-D}^n}{C_N^n}$$

qui doit être au plus égal au risque  $\alpha$ .

Cela signifie que dans une zone comprenant N tubes dont D tubes sont défectueux et où on inspecte n tubes, la relation qui relie le taux de confiance  $\alpha$  à ces paramètres est :

$$(5) \quad \frac{C_D^0 C_{N-D}^n}{C_N^n} \cong \alpha$$

Pour chaque zone, une fois le processus de dégradation amorcé, la vitesse de dégradation, laquelle est caractérisée par la pente de la fonction de distribution représentative du phénomène, nous donne, par cycle de fonctionnement, le nombre moyen espéré de défaillances.

Ceci fixe le paramètre D de la relation (5) précédente et la résolution de cette équation détermine le nombre minimum n de tubes à inspecter.

## 6 CONCLUSION

Un type de contrôle proposé, pour un taux de confiance  $\alpha = 0,05$  peut être résumé ainsi :

Cycles	ZONE 1 : Zone de boue (GV 51 A)	ZONE 2 Reste du faisceau	ZONE 3 : "Petits Cintres"	ZONE 4 : Périphériques
10 000 H	Aucun contrôle particulier	Aucun contrôle particulier	Aucun contrôle particulier	Aucun contrôle particulier
20 000 H	Inspecter 14 % des tubes ou l'ensemble si le processus de dégradation est amorcé	Aucun contrôle particulier	Aucun contrôle particulier	Aucun contrôle particulier
30 000 H	Idem contrôle précédent	A partir de 26 000 H inspecter 35 % des tubes. Etendre le contrôle à l'ensemble de la zone si un processus de dégradation est mis en évidence	A partir de 28 000 H inspecter l'ensemble de la première rangée. Etendre le contrôle à la deuxième rangée lorsqu'il y a apparition de tubes défaillants	Aucun contrôle particulier (donc rattaché à la Zone 2)
40 000 H et suivants	Idem contrôle précédent	Idem contrôle précédent	Idem contrôle précédent	A partir de 40 000 H inspecter l'ensemble de la zone périphérique

## 7 REFERENCES

- P. Chapouille et R. de Pazzis 1968. Fiabilité des Systèmes.
- EDF, SPT, GDL 1987. Programme "GENVAP". Caractéristiques des Tubes contrôlés au cours de chaque visite.
- EDF, SPT, SRDF 1987. Système de Recueil de Données de Fiabilité.
- EDF, SPT 1987. Fichier Statistiques Energétiques des Centrales.
- Lehougre J.F., Piepszownik L. 1986. Analyse des incidents des principaux matériels des centrales PWR américaines. HP/69/86/09.
- Lehougre J.F. 1986. Centrales nucléaires à eau sous pression. Comparaison des arrêts de production des différents parcs étrangers avec le parc français REP 900 MW.
- P. Pitner 1985. Etude probabiliste des incidents survenus sur les tubes des générateurs de vapeur des tranches françaises en exploitation et détermination d'une méthode d'inspection du faisceau tubulaire. HP/219/85/56.