

Document du séminaire préparatoire à la  
réunion du Conseil Sup de la Société de l'Info nucl. (21 Mars 89)

LES GENERATEURS DE VAPEUR DES CENTRALES REP

---

INTRODUCTION

QUELQUES CARACTERISTIQUES GENERALES DES GENERATEURS DE VAPEUR

Le circuit primaire du réacteur extrait la chaleur libérée dans le combustible et la transmet au circuit secondaire dans les générateurs de vapeur ; il comprend 3 boucles (réacteurs de 900 MWe) ou 4 boucles (réacteurs de 1300 et 1400 MWe) fonctionnant en parallèle et disposées autour de la cuve, comme le montre la figure A. Chacune de ces boucles comprend essentiellement deux composants : un générateur de vapeur et une pompe primaire. La circulation de l'eau s'y effectue de la façon suivante : à la sortie de la cuve du réacteur, la branche chaude de la boucle conduit l'eau au générateur de vapeur ; là, elle parcourt les tubes du générateur de vapeur, cédant sa chaleur à l'eau secondaire qui se vaporise ; elle rejoint ensuite, par une courte tuyauterie dite branche en U, la pompe primaire, qui la refoule dans la branche froide de la boucle vers la cuve du réacteur. A la branche chaude de l'une des boucles est relié le pressuriseur, qui contrôle la pression de l'eau primaire et la quantité d'eau présente dans le circuit.

Les générateurs de vapeur de réacteurs de 900 MWe (figure B) sont des composants de plus de 20m de hauteur, pesant chacun 300 tonnes à vide et 360 tonnes en fonctionnement nominal, lorsqu'ils sont remplis d'eau et de vapeur.

Chacun transmet une puissance d'environ 930 MW en vaporisant l'eau secondaire au contact d'un faisceau de tubes en forme de U renversé, parcourus par l'eau primaire .

Une plaque tubulaire horizontale épaisse (diamètre : 3,40 m, épaisseur : 53 cm), située à la partie inférieure du générateur de vapeur, comporte, disposés symétriquement de chaque côté d'une ligne de séparation diamétrale, les trous sur lesquels sont soudés les 3 361 tubes en U du faisceau. (pour un 900 MWe) - ~ 5500 tubes pour un 1300 MWe

.../...



Sous la plaque tubulaire, une paroi verticale sépare le compartiment d'arrivée et le compartiment de sortie de l'eau primaire. L'eau provenant du réacteur arrive dans le compartiment d'entrée du générateur de vapeur, pénètre dans le faisceau de tubes à travers la demi-plaque tubulaire, monte puis redescend dans les tubes en U en se refroidissant, traverse l'autre demi-plaque pour déboucher dans le compartiment de sortie d'où elle est entraînée vers la pompe.

L'eau secondaire arrive dans la partie haute du générateur de vapeur, descend à la périphérie de l'appareil dans un espace annulaire délimité par la paroi extérieure et une "chemise" cylindrique qui entoure le faisceau, avant de pénétrer au contact des tubes juste au-dessus de la plaque tubulaire. Elle se vaporise ensuite en remontant dans la partie centrale occupée par les tubes ; la vapeur obtenue est alors séchée dans la partie supérieure du générateur de vapeur, grâce à deux dispositifs qu'elle traverse successivement : des séparateurs à cyclone, qui éliminent une grande partie de l'eau par centrifugation, puis un ensemble de sécheurs à chevrons qui permettent de réduire le taux d'humidité de la vapeur (titre en eau) à 0,25 %.

Au régime de fonctionnement nominal, chaque générateur produit 1 820 tonnes par heure de vapeur saturée à 273 °C et 58 bar. Le tableau ci-dessous rassemble les principales caractéristiques de ces appareils, comparées pour les tranches de 900 et de 1300 MWe.

	REP 900	REP 1 300
<b>Dimensions générales</b>		
Hauteur totale	20,6 m	22,14 m
Masse totale à vide	300 t	430 t
Masse en fonctionnement normal	360 t	530 t
Diamètre de la partie inférieure	3,43 m	3,76 m
Epaisseur de la plaque tubulaire	0,534 m	0,605 m
<b>Faisceau de tubes</b>		
Surface d'échange	4 700 m <sup>2</sup>	6 900 m <sup>2</sup>
Nombre de tubes en U	3 361	5 342
Diamètre des tubes (extérieur)	22,2 mm	19 mm
<b>Caractéristiques de la vapeur</b>		
Débit	1 820 t/h	1 940 t/h
Pression (sortie GV)	58 bar	71 bar
Température (sortie GV)	273°C	287 °C

.../...

## LES PROBLEMES POSES

L'expérience montre que les tubes de générateurs de vapeur se dégradent plus ou moins rapidement suivant le type de maladie dont ils sont affectés. Cette dégradation peut conduire à des situations incidentelles ou accidentelles allant de la petite fuite (quelques litres/h) primaire-secondaire jusqu'à la rupture d'un tube, voire d'un ensemble de tubes.

Les générateurs de vapeur existant sur le parc français peuvent être classés en trois catégories suivant le métal employé pour la réalisation de leurs tubes :

- inconel 600 pour les 26 premières tranches de 900 MWe
- inconel 600 traité thermiquement pour les 6 dernières ainsi que pour les tranches 1300 MWe
- inconel 690 pour les futurs réacteurs de 1400 MWe (N4).

Jusqu'en 1988, les phénomènes observés concernaient essentiellement la première catégorie. Ces phénomènes commencent à apparaître sur les générateurs de vapeur traités thermiquement. Les spécialistes espèrent que l'emploi de l'inconel 690 comme métal de base pour les futurs réacteurs de 1400 MWe pourra retarder l'apparition des dégradations.

La première partie du rapport décrit les "maladies" des tubes (endommagements par usure, par corrosion en paroi externe, par corrosion sous contrainte en paroi interne). Elle fait également l'inventaire des moyens d'action de l'exploitant pour connaître ou améliorer l'état des tubes : surveillance en fonctionnement, surveillance à l'arrêt, techniques de prolongation de la vie d'un générateur de vapeur et de remplacement. Cette première partie couvre donc le volet "prévention" des problèmes de sûreté : comment connaître les phénomènes et agir pour qu'un incident ou accident reste aussi peu probable que possible ?

La seconde partie du rapport aborde l'autre volet de la défense en profondeur : en supposant qu'un accident se produise, quels en sont le déroulement et les conséquences ? Comment limiter ces conséquences ? Est également présentée l'expérience française et internationale en matière de ruptures de tube de générateur de vapeur.

.../...

## LES ENJEUX

Il convient de considérer le couple "probabilité-conséquences" des accidents liés à une ou plusieurs défaillances de tube de générateur de vapeur.

### a) les probabilités : la prévention

Il est clair que la dégradation des tubes de générateur de vapeur augmente corrélativement leur probabilité de défaillance. Au début du programme des réacteurs 900 MWe, la rupture d'un tube a été classée en 4ème catégorie (fourchette de probabilité :  $10^{-6}$  à  $10^{-4}$  occurrence par réacteur et par an). Aujourd'hui, cet événement est assimilé à un accident de 3ème catégorie (probabilité  $10^{-2}$  à  $10^{-4}$ ). Une vigilance sera nécessaire pour vérifier qu'il ne sort pas de cette dernière fourchette.

Un dialogue parfois difficile a lieu entre l'exploitant et le SCSIN sur l'ampleur des mesures préventives à adopter. L'impact économique (direct ou indirect, par indisponibilité résultante de la tranche) est important. Or, quantifier de façon précise et indiscutable le lien entre la probabilité de défaillance et l'état de la tranche semble très difficile, sinon impossible. Il en est de même pour le lien entre la probabilité de défaillance et le volume de l'effort de contrôle préventif ou de bouchage de tubes affectés.

En revanche, tout doit être mis en oeuvre pour connaître aussi précisément que possible l'état des générateurs de vapeur et la nature des maladies qui affectent les tubes. Le programme de surveillance (contrôle in situ, extraction et expertises de tubes) doit permettre de diagnostiquer des maladies, de connaître leur évolution et de vérifier que les dégradations ne présentent pas une nature inacceptable : en particulier, il est nécessaire de s'assurer que les tubes laissés en service ne risquent pas de rompre en situation normale ou accidentelle et que leur dégradation éventuelle conduira à une fuite mesurable, au vu de laquelle le réacteur pourra être arrêté avant qu'une rupture n'intervienne.

Les moyens de contrôles et les études actuelles donnent à cet égard des garanties, mais doivent être en permanence améliorés, pour tenir compte de l'évolution des dégradations et tenter d'éviter toute rupture. L'absence de certitudes conduit le SCSIN à demander un renforcement des actions d'EDF dans ce domaine.

La prévention à moyen et long terme pose des problèmes de nature différente. Les tentatives de ces dernières années pour établir un pronostic d'évolution des dégradations ont souvent été des échecs. Il convient donc de se prémunir contre des scénarios, sans doute pessimistes, d'évolution rapide et défavorable où ni les techniques de "prolongation de vie" des tubes, ni les efforts préventifs ne pourraient empêcher d'atteindre des probabilités de défaillance inacceptables.

C'est pourquoi le SCSIN attache une grande importance à ce que l'on dispose de moyens de réparation (et notamment de remplacement). Dans un parc nucléaire standardisé, on ne peut courir le risque de laisser s'accumuler un nombre important de tranches très dégradées et sur lequel on pourrait être incapable d'engager des réparations en temps utile.

Aussi, la décision de changer les générateurs de vapeur de la tranche de Dampierre 1 à son prochain arrêt (soit début 90) est essentielle. Cette opération permettra :

- d'assainir la situation de Dampierre 1, tranche la plus affectée de défauts
- de confirmer la faisabilité technique de l'opération, les doses résultant pour le personnel ainsi que les pronostics de nature économique (indisponibilité prévue de l'ordre de 6 mois, coût de l'ordre de 300 MF par tranche)
- d'expertiser les générateurs de vapeur extraits, ce qui devrait apporter de précieuses informations sur les caractéristiques des dégradations.

Par contre, Il n'est pas indispensable de programmer dès aujourd'hui les remplacements ultérieurs (années 1991 et suivantes). Les approvisionnements de générateurs de rechange étant assurés, on peut prévoir ces décisions courant 1990, en tenant compte des résultats de contrôles et de l'expérience à acquérir d'ici là.

b) les conséquences : la gestion des accidents éventuels.

Il convient de souligner les efforts importants engagés par l'exploitant, en vue de définir et de mettre en oeuvre de façon fiable une gestion optimale permettant d'éviter ou de minimiser les rejets :

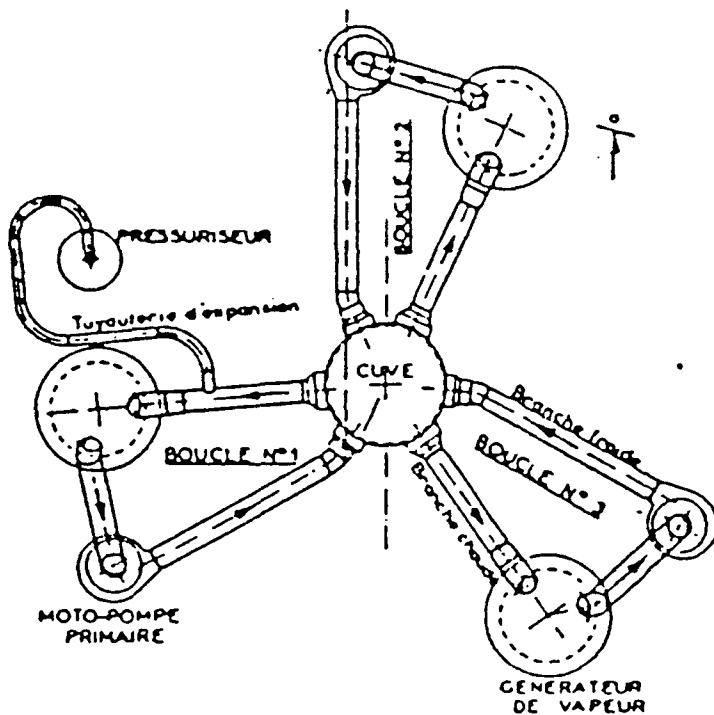
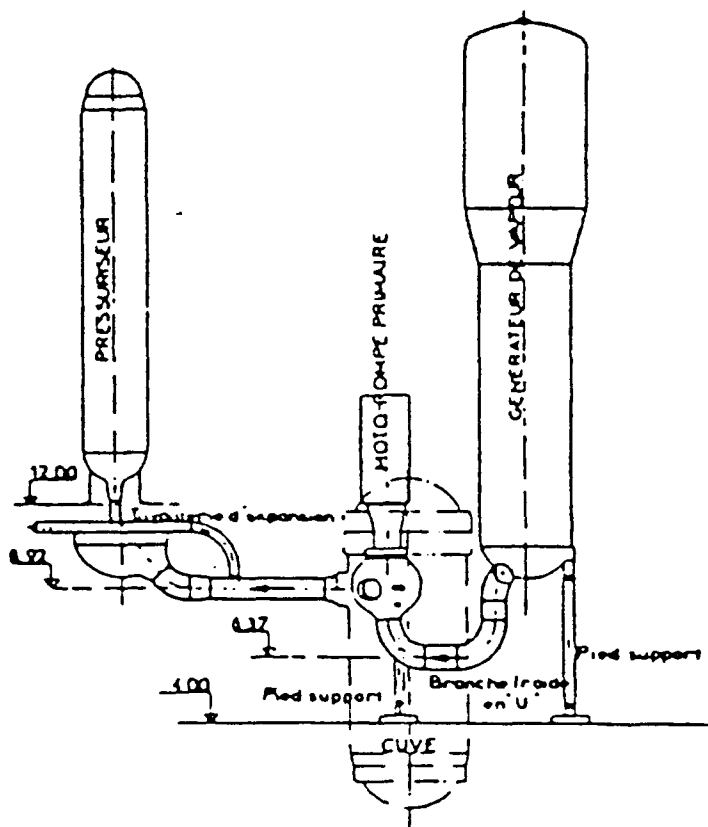
- amélioration des procédures
- adaptations des installations (faites ou à l'étude)
- formation des opérateurs.

L'expérience internationale de 7 ruptures de tubes de générateurs de vapeur sur des réacteurs à eau sous pression peut donner la tentation de relativiser l'enjeu. Il faut cependant garder à l'esprit que c'est à partir d'une telle situation incidentelle ou accidentelle relativement mineure que l'on peut imaginer, par cumul avec d'autres difficultés, une dérive vers un scénario à conséquences plus graves.

C'est pourquoi la nécessaire bonne préparation à l'intervention ne doit en aucun cas conduire à un relâchement des efforts de prévention.

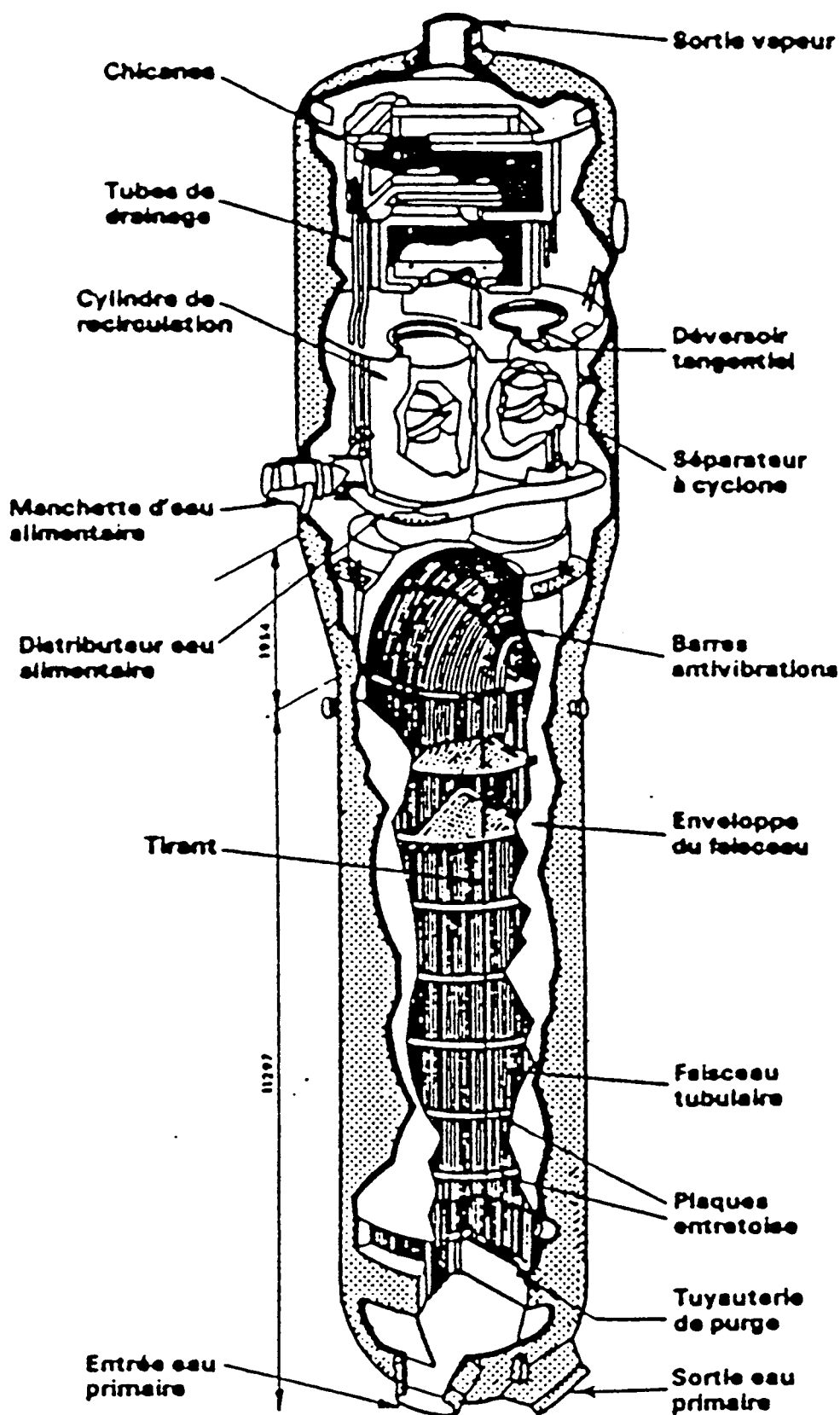
- FIGURE A -

Circuit primaire PWR 900 (3 boucles)





- FIGURE B -



# LES GENERATEURS DE VAPEUR DES CENTRALES REP

---

## PREMIERE PARTIE

	(1 - Endommagement par usure	(page 2)
Les types de dégradations observées	(	
	(2 - Corrosion en milieu secondaire	(page 4)
	(	
	(3 - Fissuration par corrosion sous tension en milieu primaire	(page 6)
	(	
	4 - La surveillance	(page 9)

Annexe : figures n° 1 à 18

Les tubes des générateurs de vapeur constituent la principale interface entre les parties primaire et secondaire d'une tranche nucléaire à eau sous pression (figure 1) ; l'expérience d'exploitation de ces quinze dernières années a montré qu'ils pouvaient être l'objet de dégradations importantes susceptibles en conséquence de mettre en cause l'intégrité du circuit primaire principal.

Les types de dégradations observées peuvent être classés en trois catégories :

- les endommagements par usure en paroi externe des tubes (usure contre les barres anti-vibratoires, usures entre grands cintres, usure par corps étrangers),

- les endommagements par corrosion en paroi externe, c'est-à-dire côte secondaire (dans la zone des boues et au droit des plaques entretoises),

- les endommagements par corrosion sous contrainte en paroi interne, c'est-à-dire en milieu primaire (petits cintres et zone de transition de dudgeonnage).

Ces problèmes affectant les tubes de générateurs de vapeur ont obligé EDF à renforcer ou à engager d'importants moyens de surveillance en fonctionnement, de contrôles à l'arrêt, d'expertises et d'études.

.../...

.....

Le troisième type de dégradation cité est de loin le plus répandu sur le parc français. Il est à l'origine du développement par EDF et FRAMATOME de plusieurs techniques de prolongation de vie ou réparation ainsi que du remplacement de générateur de vapeur.

## 1 - Endommagements par usure

### 1.1. Les usures des cintres contres les barres anti-vibratoires

Il s'agit d'une usure par choc ou frottement entre les cintres du chignon du faisceau tubulaire et les barres anti-vibratoires (cf. figure 2).

Les mouvements des pièces concernées sont induits soit par la turbulence de l'émulsion eau-vapeur, pouvant entraîner l'instabilité fluide-élastique de l'ensemble de ces pièces.

L'usure par les barres carrées crée des empreintes en forme de méplats longs d'environ 8 mm. Cette usure concerne généralement quelques tubes d'une zone de tubes à plus grands cintres ; ce processus comporte une période de latence d'environ 6 ans (correspondant très probablement à la durée d'usure de la couche de chrome recouvrant les barres anti-vibratoires en inconel 600) suivie d'une usure lente des tubes.

Ce mode d'endommagement n'a jamais conduit à une fuite de fluide primaire sur les générateurs de vapeur français. L'ensemble des tubes situés dans la zone sensible au phénomène fait l'objet d'un contrôle périodique (par moitié à chaque arrêt).

Les tubes présentant au contrôle non destructif une indication de manque de matière supérieure à 40 % de l'épaisseur du tube sont bouchés.

Cette pratique a conduit au bouchage de 21 tubes en 1988 (22 en 1987) sur près de 10 000 tubes contrôlés pour le suivi en service de ce type de dégradation.

Actuellement, des mesures correctives sont mises en place en fabrication : chromage amélioré des barres et modification du procédé de tubage pour mieux répartir les jeux.

### 1.2. Les usures par corps étrangers

La présence accidentelle d'un corps étranger dans les parties secondaires des générateurs de vapeur peut provoquer l'endommagement des tubes périphériques par usure.

L'objet, soumis aux écoulements du fluide secondaire, s'insère, se bloque entre les premiers tubes périphériques.

.../...

.....  
Si l'objet est mis en vibration par les fluctuations thermohydrauliques, il peut en résulter une usure notable de la paroi du ou des tubes d'échange au contact.

L'expérience de ce phénomène acquise sur les tranches du parc EDF montre que l'endommagement avancé de la paroi du tube a provoqué, dans tous les cas, une fuite détectable sans que la tenue mécanique ait pu être suspectée.

D'une manière générale, il convient de souligner que les endommagements par corps migrants ont entraîné au cours de l'exploitation des tranches du parc EDF, la plus grande partie des arrêts fortuits.

Une vérification de l'absence de corps étrangers est actuellement prévue à chaque arrêt de tranche.

En cas de découverte d'un tel corps, tout est mis en oeuvre pour l'extraire, et le contrôle des tubes susceptibles d'usure est réalisé.

### 1.3. Usure des tubes à grand cintre :

Des jeux faibles ont été détectés en fabrication entre les tubes à plus grands cintres des générateurs des vapeur des tranches REP 1300 MWE. Ce phénomène peut s'expliquer par l'augmentation notable du nombre des tubes d'échange dans ces composants par rapport à ceux des tranches de 900 MWe (5500 tubes contre 3300 tubes environ).

Les 14 premiers générateurs de vapeur répartis sur 7 tranches REP 1300 MWe présentent un nombre de proximités de tubes atteignant 100 cas au maximum. Les composants suivants ont fait l'objet de mesures constructives qui ont permis d'éliminer ces proximités et les risques d'usures induits.

Des contrôles périodiques sont réalisés sur les tubes à plus grands cintres avec une périodicité réduite de moitié par rapport au contrôle normal (soit 1 tube sur 4 au lieu de 1 tube sur 8).

Une méthode de contrôle spécifique permettant de détecter les jeux faibles entre tubes et de mesurer les profondeurs des éventuelles usures a été spécialement développée pour ce cas particulier d'endommagement.

A ce jour, 7 usures de profondeurs inférieures à 25 % de l'épaisseur du tube ont été mises en évidence.

.../...

.....

2 - Corrosion en milieu secondaire

Historiquement, les dispositions constructives retenues pour les tubes de générateurs de vapeur tendaient principalement à prévenir les risques de corrosion apportés par l'eau du circuit secondaire : les générateurs de vapeur français ont ainsi "bénéficié", depuis FESSENHEIM 1, du retour d'expérience étranger notamment pour ce qui concerne les points suivants :

- choix d'un alliage austénitique à haute teneur en nickel (l'inconel 600) pour prévenir les risques de corrosion en présence de chlorures,

- adoption, dès le démarrage de FESSENHEIM 1, d'un traitement volatil de l'eau secondaire et d'un contrôle chimique étroit de celle-ci,

- comblement par dudgeonnage (expansion mécanique du tube) de l'interstice tube/plaque tubulaire pour prévenir les risques de séquestration d'impuretés chimiques.

Par la suite, d'autres dispositions ont été mises en oeuvre au fur et à mesure des constructions :

- amélioration du balayage de la plaque tubulaire par l'eau secondaire pour limiter les risques de dépôt de boues,

- choix de nouveaux matériaux et perçage des plaques entretoises afin de limiter les risques de "denting" (constriction des tubes au droit des plaques entretoises) tels que ceux rencontrés aux USA (figure 3) ;

- réalisation d'un dudgeonnage mécanique complémentaire pour réduire le niveau des contraintes résiduelles du côté secondaire dans la zone de transition de dudgeonnage (figure 4) ;

- réalisation d'un traitement thermique complémentaire des tubes en inconel 600 pour limiter leur sensibilité à la corrosion en milieu caustique.

Ces diverses mesures ont contribué de manière certaine à réduire l'ampleur de la corrosion des tubes de générateur de vapeur en milieu secondaire et ont ainsi permis d'éviter les très nombreux problèmes rencontrés à l'étranger en ce domaine. Néanmoins, quelques cas de dégradations de ce type sont rencontrés dans certaines zones présentant une thermohydraulique et une chimie locale particulières.

.../...

.....

## 2.1. Corrosion au niveau des plaques entretoises

Il s'agit d'une corrosion intergranulaire qui prend naissance du côté secondaire au niveau des plaques entretoises, généralement en branche chaude, et qui est attribuée à la concentration d'espèces caustiques dans l'espace entre tube et plaque entretoise, dans une configuration particulière de perçage de ces plaques (cf. figure 3). Cette corrosion se manifeste par une décohésion intergranulaire formant des fissures longitudinales initiées en peau externe et qui restent limitées à l'épaisseur de la plaque entretoise (cf. figure 5 et 6).

En 1986, lors des examens non destructifs des tubes des générateurs de vapeur de FESSENHEIM 1 après 7 cycles de fonctionnement, des indications de défauts en peau externe ont été relevées. L'expertise de trois tubes extraits a confirmé la présence de ce phénomène de corrosion, déjà rencontré à l'étranger.

Depuis, plusieurs cas de fissuration analogue, généralement beaucoup moins développée, ont été mis en évidence sur d'autres tranches.

Des études théoriques et expérimentales sont menées pour déterminer l'influence des paramètres chimiques en exploitation sur le processus de dégradation. Outre la qualité chimique du circuit secondaire, les régimes d'exploitation interviennent par des effets complexes de déséquestration des espèces déposées dans les interstices. Des analyses de dépôts externes sur des tubes extraits sont envisagées.

Les tubes qui ont présenté lors de contrôles antérieurs une indication de défaut font l'objet d'un suivi systématique à chaque arrêt de tranche.

La nocivité de ce type de défaut est limitée par la présence de la plaque entretoise et du fait que la hauteur, des fissures ne dépasse pas l'épaisseur de la plaque

## 2.2. Corrosion en pied de tube

Les contrôles non destructifs réalisés au titre du programme de base ont mis en évidence des indications de fissuration longitudinale longue et externe sur quelques tubes situés dans la zone des dépôts de boues du GV 1 de BUGEY 3, après 67000 heures de fonctionnement. Des extensions à l'enveloppe de la zone (600 tubes), ont révélé en tout 10 tubes affectés de ce type de défaut ; trois tubes ont été extraits.

.../...

.....

Les résultats des examens destructifs ont mis en évidence que les défauts sont constitués de fissures longitudinales multiples, initiées en peau externe situées au-dessus de la plaque tubulaire, et sur une hauteur d'environ 20 mm. Leur étendue sur la circonférence du tube est variable. Aucun des défauts n'est traversant : la profondeur maximale est d'environ 1 mm.

Les pressions d'éclatement des tubes extraits varient entre 470 et 600 bars. L'éclatement s'est produit par déchirure des ligaments séparant plusieurs fissures alignées.

L'analyse chimique réalisée sur les dépôts externes des tubes extraits est de nature à établir qu'il s'agit d'un phénomène de corrosion sous contrainte favorisée par un milieu agressif dont l'origine se trouve dans la présence de boues enserrant la zone affectée de fissures.

Très récemment, des défauts du même type ont été détectés sur 3 tubes répartis sur deux générateurs de vapeur de BUGEY 2.

### 3 - Fissuration par corrosion sous tension en milieu primaire

Le milieu du circuit primaire, contrairement au circuit secondaire, n'est pas le siège de phénomènes d'évaporation avec les risques de dépôts et de surconcentration qui en résultent.

L'eau du circuit primaire renferme très peu d'additifs chimiques et sa composition est très stable et contrôlée. Malgré cela, il s'est avéré en exploitation que l'acier Inconel 600 constitutif des tubes, présente une susceptibilité à la corrosion fissurante sous contrainte dans le milieu primaire.

Les faisceaux tubulaires sont actuellement fabriqués en acier Inconel 690 réputé insensible à ce type de corrosion pour les niveaux de contraintes susceptibles d'être rencontrés. Ceci concerne les deux dernières tranches 1300 MWe et les tranches du palier N 4.

#### 3.1. Défauts affectant les tubes les plus cintrés

De par leur forme en U, les tubes de générateurs de vapeur doivent subir une opération de cintrage en fabrication, qui engendre d'importantes contraintes résiduelles, se superposant aux contraintes de fonctionnement.

Les tubes du premier rayon de cintrage (cintres R 1) de fabrication WESTINGHOUSE, ont été les premiers à présenter des signes de dégradations qui ont été mis en évidence par les contrôles non destructifs réalisés.

.../...



.....  
Par similitude aux résultats des investigations réalisées aux Etats-Unis sur ce type de défaut, le type de dégradation rencontré est attribué à un phénomène de corrosion intergranulaire sous contrainte du matériau Inconel 600.

Les fortes contraintes résiduelles de fabrication sont à l'origine d'une fissuration d'orientation circonférentielle inclinée. Certains cas de fuite entre fluides primaire et secondaire ont été attribués à une telle fissuration.

La totalité des tubes à plus petit rayon de cintrage de fabrication WESTINGHOUSE ont été obturés entre 1984 et 1986.

La mesure corrective adoptée en fabrication consiste en un traitement thermique de détensionnement des contraintes après cintrage.

Un procédé permettant d'effectuer un traitement de ce type sur site a été développé et mis en oeuvre par FRAMATOME. Il sera présenté ci-dessous avec les autres procédés préventifs de prolongation.

3.2. Zones de transition de dudgeonnage

Le dudgeonnage est l'opération qui consiste à plaquer le tube dans l'alésage de la plaque tubulaire, de manière à assurer la tenue mécanique de l'assemblage tube/plaque tubulaire, ainsi que le comblement de l'interstice côté secondaire.

Cette opération induit nécessairement des contraintes résiduelles importantes et donc un risque de corrosion sous tension en milieu primaire. Du fait de la présence de la plaque tubulaire, seule la fissuration en zone de transition de dudgeonnage a une conséquence sur l'intégrité du circuit primaire principal (v. figure 7).

Il existe dans les tubes des contraintes axiales ou longitudinales et des contraintes circonférentielles. C'est le sens des plus grandes contraintes qui déterminera l'orientation préférentielle des fissures : orientation de fissures longitudinales pour des contraintes circonférentielles et vice et versa.

D'autre part, il faut garder à l'esprit que des contraintes en fonctionnement se superposent aux contraintes résiduelles de fabrication et que la répartition des premières peut être perturbée par la présence de boues côté secondaire tout comme les secondes sont très sensibles au procédé de dudgeonnage ou à certaines anomalies de fabrication.

Par ailleurs, du fait de l'influence défavorable de la température, seules les extrémités de tube en branche chaude sont affectées.

.../...

.....

Historiquement, trois techniques de dudgeonnage ont successivement été utilisées :

- le dudgeonnage par explosif réalisé uniquement sur les générateurs de vapeur de FESSENHEIM 1,
- le dudgeonnage mécanique intégral (DMI) réalisé sur les générateurs de vapeur de FESSENHEIM 2 et BUGEY 2, 3 et 4.,
- le dudgeonnage mécanique intégral avec dudgeonnage complémentaire (DAM) ; ce DAM a été exécuté sur site avant démarrage ou lors de la fabrication ; il est réalisé sur les GV 900 MW à partir de BUGEY 5 et sur les GV 1300 MW (v. figure 7).

Dans le premier cas, la fissuration est de type circonférentielle, initiée côté primaire ou secondaire, et a atteint exclusivement le GV 3 de FESSENHEIM 1 dans une région précise du faisceau tubulaire où s'accumulent des dépôts de boues. De nombreux tubes ont été obturés. Le contrôle systématique de la zone des boues chaque année n'a pas montré de progression du phénomène depuis plusieurs années.

Dans le deuxième cas, la fissuration est apparue après 25000 h de fonctionnement. Les fissures sont longitudinales, courtes (9 mm) et initiées côté primaire (v. figure 8). Le contrôle périodique d'un tube sur 8 montre que la proportion de tubes fissurés reste très faible (< 3 %) après plus de 65000 heures de fonctionnement.

Enfin, le troisième type de dudgeonnage (mécanique + DAM) est celui qui concerne le plus grand nombre de tranches. La dégradation a débuté après environ 20 000 h de fonctionnement sur certains générateurs de vapeur et est responsable de l'obturation d'environ 1200 tubes (près de 40 % des causes de bouchage).

Ce phénomène a pris différentes formes de fissuration :

- des fissures longitudinales longues dans la transition entre dudgeonnage intégral et complémentaire, se prolongeant dans la hauteur du dudgeonnage complémentaire ; ce sont les plus communes (figure 9) ;
- des fissures circonférentielles axisymétriques liées à des anomalies de dudgeonnage,
- quelques cas de fissures circonférentielles sur certains tubes, situées dans la zone centrale de la plaque tubulaire (cf. figures 10 et 11) ;
- des fissures longitudinales multiples associées à des réseaux de très petites fissures (DAMPIERRE 1) (figures 12 et 13) ;
- des combinaisons de fissures : fissures en vis-à-vis, fissures en U ou en L.

.../...

.....

Le taux de fissuration est utilisé depuis plusieurs années pour suivre l'extension de la corrosion.

Il s'agit, pour un GV donné, du pourcentage de tubes présentant une indication de défaut au contrôle non destructif. Il est déterminé à partir d'un échantillon d'environ 400 tubes. Cet échantillon est généralement celui qui est contrôlé lors de la visite périodique au titre de la surveillance de base (1 tube sur 8).

Le tableau en figure 14 présente les valeurs atteintes en 1988.

On retiendra qu'il existe des disparités importantes entre tranches et entre composants d'une même tranche sans cause clairement identifiée.

Néanmoins, quelques générateurs de vapeur n'ont pratiquement aucun tube fissuré après plus de 50 000 heures. Les faisceaux d'origine SANDVIK sont parfaitement sains après plus de 70 000 heures.

D'autre part, un traitement thermique complémentaire a été introduit en fabrication à partir de CRUAS 1, car les études montrent un effet bénéfique notable sur la susceptibilité de l'Incoel 600 pour des tubes contenant moins de 0,035 % de carbone. Récemment, les conclusions de ces études sont susceptibles d'être remises en cause, car il a été constaté des fissures après 40 000 heures à BLAYAIS 4 et après 26500 à PALUEL 2.

Le phénomène de corrosion sous tension en milieu primaire a entraîné la mise en oeuvre d'importants moyens en matière de surveillance, d'études et de techniques de réparation, qui sont exposés dans les chapitres ci-dessous.

Il faut noter que jusqu'à présent, ce phénomène n'a pas occasionné de rupture en pied de tube.

#### 4 - La surveillance

##### 4.1. Moyens d'investigations et d'études - Surveillance en fonctionnement.

De très importants moyens d'investigations sont mis en oeuvre :

- développement des méthodes de contrôle, par courants de Foucault (sonde tournante longue), par test d'étanchéité à l'hélium (voir paragraphe suivant), par ultrasons ;

- extractions pour expertise de ~~près~~ de 120 tubes,

.../...

.....

- essais de reproduction des phénomènes en laboratoire, évaluation des niveaux de contrainte,

- analyses de comportement mécanique des défauts et études d'applicabilité du concept de fuite avant risque de rupture.

Les analyses de nocivité effectuées visent principalement à évaluer les risques de rupture de tube de générateur de vapeur qui peuvent résulter des dégradations constatées sur les tranches en service, ceci notamment dans les situations accidentelles les plus pénalisantes vis-à-vis de ce risque (rupture de tuyauterie de vapeur, rupture de tuyauterie d'eau alimentaire, c'est-à-dire une différence de pression  $P = 172$  b entre primaire et secondaire) : le comportement de défauts types affectant les tubes des générateurs de vapeur et la détermination de leurs dimensions critiques sont ainsi analysés.

Ces travaux ont fait l'objet d'un programme d'études engagé par l'exploitant et comportant une phase expérimentale importante ; elles ont permis d'aboutir à une détermination des dimensions de défauts instables en situations accidentelles :

- défauts non traversants de type amincissement ; réduction d'épaisseur critique supérieure à 60 % de l'épaisseur du tube,

- défauts traversants de type fissures longitudinales ; longueur critique supérieure à 16 mm en partie courante de tube,

- défauts traversants de type fissures circonférentielles ; longueur critique supérieure à la demi-circonférence du tube.

Une étude spécifique à DAMPIERRE 1 a également été menée pour préciser l'influence des réseaux de fissures peu profondes sur la taille du défaut traversant critique.

Connaître la taille des défauts critiques permet d'établir un critère de bouchage des tubes lors des contrôles non destructifs en arrêt de tranche. Cependant, compte tenu du fait que ces contrôles ne sont pas exhaustifs (voir § suivant), et qu'il subsiste des incertitudes sur l'évolution possible des défauts en un cycle, la démarche de l'exploitant a été complétée par la notion de critère de surveillance en fonctionnement des fuites primaire-secondaire. L'utilisation de ce critère est motivée par le fait que toute fissure instable en situations accidentelles doit conduire à une fuite importante, d'où la dénomination de critère de fuite avant risque de rupture (FARR). Des essais ont conduit tout d'abord à l'utilisation d'un critère de fuite primaire - secondaire de 70 litres par heure, pour les fissures traversantes, longitudinales et circonférentielles partielles (ce critère n'étant pas suffisant pour les tubes à risque de fissuration circonférentielle axisymétrique, ceux-ci ont fait l'objet d'un programme particulier de surveillance à l'arrêt).

.../...

.....  
Cependant, il a été observé en 1987 et 1988 que dans une zone particulière du faisceau correspondant à des dépôts très compacts de boues côté secondaire, on pouvait rencontrer :

- des fissures circonférentielles affectant une grande partie de la circonférence du tube,
- des combinaisons de fissures pénalisantes vis-à-vis du critère de FARR (fissures en vis-à-vis, fissures en U ou en L),
- des défauts entraînant une fuite beaucoup plus faible que celle prévue à partir des essais en laboratoire.

Il a été constaté alors que cette zone de boues présentait :

- une proportion de tubes fissurés plus importante (jusqu'à 70% pour certains GV). Ceci peut s'expliquer par le fait que la présence des boues élève la température des tubes (une différence de 12° C conduit à diviser par deux le temps d'apparition de la corrosion),
- des fissures circonférentielles que l'on peut expliquer par des contraintes en fonctionnement particulières dues à la présence de boues.

Dans cette zone des boues, est effectué un contrôle périodique exhaustif à la sonde d'expertise (voir § suivant) avec un critère de bouchage plus sévère.

D'autre part, pour tenir compte des incertitudes sur le taux de fuite des défauts critiques, l'exploitant a adopté pour toutes les tranches sur lesquelles le phénomène s'est déclaré, une règle de fonctionnement à fuites faibles (RFFF) consistant essentiellement à ramener le critère de 70 l/h à 5 l/h, c'est-à-dire quasiment au seuil de détectabilité (à titre de comparaison une rupture de tube de générateur de vapeur engendre une fuite de 30 à 170 m3/h).

Cette règle est associée à un test d'étanchéité à l'hélium à l'arrêt pour les tranches les plus affectées et dans le cas de fuite primaire - secondaire en service.

4.2. Surveillance à l'arrêt

La surveillance à l'arrêt s'appuie notamment sur la réalisation de contrôles périodiques (généralement contrôles non destructifs par courants de Foucault complétés par un test d'étanchéité à l'hélium), et l'application de critères de bouchage de tubes.

Le contrôle par courants de Foucault consiste à passer des bobines électromagnétiques dans le tube, et analyser les perturbations de l'impédance produite par les défauts.

..../....

.....  
Le test He consiste à remplir le secondaire du générateur de vapeur d'un mélange air - hélium (5 % d'He - 6 bars absolus) et détecter les fuites tube à tube par spectromètre de masse.

Un programme de base de contrôle par sondage (1 tube sur 8 en sonde axiale courants de Foucault) permet de détecter l'apparition de problèmes nouveaux éventuels et d'établir un taux de fissuration pour chaque générateur de vapeur. Il est complété par des programmes de plus en plus lourds, spécifiques aux problèmes déjà connus et étudiés. Ainsi, un générateur de vapeur fait l'objet d'un programme de contrôle d'autant plus lourd qu'il est plus affecté. Le programme général annuel de maintenance des tubes de générateur de vapeur est communiqué par l'exploitant en préalable à l'Administration, qui peut formuler des demandes complémentaires.

En cas d'indication dans les zones de transition de dudgeonnage, des moyens d'expertises non destructifs sont utilisés (sonde tournante longue à courant de Foucault), l'extraction étant décidée dans certains cas pour procéder à une expertise destructive. Si les critères de bouchage ne sont pas dépassés, un contrôle d'expertise est néanmoins systématiquement effectué lors des visites ultérieures. Les tubes extraits jusqu'à présent ont présenté des pressions d'éclatement supérieures à 250 b (à comparer à 172 b en situation accidentelle).

4.3. Technique de prolongation et de réparation

Le bouchage de tubes de générateurs de vapeur n'a pas d'incidence notable sur le fonctionnement d'une tranche, tant que la proportion de tubes bouchés n'excède pas 15 %. Du fait que la fissuration en zone de transition de dudgeonnage est susceptible d'affecter à terme tous les tubes d'un faisceau, l'exploitant a dû :

- développer des procédés destinés à freiner, voire stopper l'évolution des dégradations,
- prévoir l'éventualité d'un remplacement de générateur de vapeur.

Une technique envisagée depuis peu consiste à baisser la température du fluide primaire de 10° C, en baissant la puissance de 10 %, dans l'objectif de freiner l'extension du phénomène qui est activé thermiquement.

Les procédés dont la mise en oeuvre a eu lieu ou a été décidée, sont exposés ci-dessous.

Toutes ces techniques de prolongation et de réparation font l'objet de dossiers de justification et de qualification qui sont examinés en détail par l'Administration en préalable à la mise en oeuvre.

.../...

.....

4.3.1. Traitement thermique des petits cintres

Ce procédé consiste à détensionner thermiquement sur site les contraintes résiduelles de fabrication présentes dans les petits cintres et causant une fissuration sous tension en milieu primaire (voir § 3.1).

La courbe en figure 15 donne la relaxation des contraintes en fonction de la température. En pratique, une canne souple chauffante par résistance électrique est glissée à l'intérieur du tube (v. figure 16).

5 tranches ont ainsi été traitées en 1987 et 1988, 12 sont prévues en 1989.

4.3.2. Microbillage et martelage

Ces procédés consistent en un détensionnement mécanique en peau interne au niveau des zones de transition de dudgeonnage : des billes sont projetées (microbillage, voir figure 17) ou frappées (martelage) sur la surface interne des tubes. Ceci engendre des contraintes de compression en peau empêchant l'initiation de fissures de corrosion sous contraintes.

Cependant, l'évolution de fissures existantes ne peut être évitée.

Tous les générateurs de vapeur à faisceau tubulaire non traités thermiquement ont fait l'objet d'un tel traitement entre fin 1985 et fin 1987). Un ralentissement du taux de fissuration est noté deux années après le traitement.

4.3.3. Manchonnage

Cette technique de réparation consiste à interposer une manchette entre le tube et le circuit primaire, au niveau de la zone de transition de dudgeonnage. Il existe divers procédés de manchonnage utilisés actuellement dans le monde.

Le procédé choisi par EDF consiste à utiliser une manchette en inconel 690 (réputé insensible) et à la fixer par expansion mécanique et soudure (procédé TIG) avec un détensionnement thermique du joint supérieur (voir figure 18).

Des manchettes ont ainsi été posées à TRICASTIN 2 en nombre limité. Une deuxième intervention est prévue sur BUGEY 5. Le déroulement de ces opérations est suivi attentivement par l'Administration.

.../...