

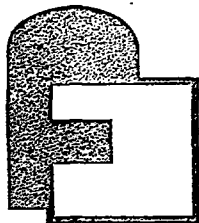
LE GENERATEUR DE VAPEUR

A. REMOND

NOTES

ET

DOCUMENTS



**FRAMATOME**

Conférence présentée par Framatome

CONFERENCE SUR LA DEUXIEME BARRIERE DE SURETE

SFEN

Paris (France) 9 octobre 1986

CONFERENCE SFEM du 9 Décembre 1986

La Deuxième Barrière de Sécurité

Le Générateur de Vapeur

A.REMOND ( FRAMATOME )

M.HUTIN ( EDF/ SPT )

## SOMMAIRE

1. - INTRODUCTION
2. - LES MODES D'ENDOMMAGEMENT POTENTIELS
  - 2.1. - Généralités
  - 2.2. - Les différents phénomènes de corrosion, non vécus en FRANCE
  - 2.3. - Les phénomènes de corrosion primaire rencontrés en FRANCE
  - 2.4. - Les autres phénomènes d'endommagement de tubes
3. - LES CRITERES DE SURETE APPLIQUES AU TUBE DE GV
  - 3.1. - Conception
  - 3.2. - Limite technique d'exploitation adoptée en FRANCE
  - 3.3. - Limites techniques d'exploitation adoptées à l'étranger
4. - ELABORATION ET JUSTIFICATION DES CRITERES FRANCAIS DE SURETE
  - 4.1. - Méthodes de contrôle non destructif
  - 4.2. - Taille critique de défaut
  - 4.3. - Débits de fuite associés aux défauts traversants
  - 4.4. - Cinétique d'endommagement - Notion de GV "précurseur "
  - 4.5. - Prélèvements de tubes in situ

5. - LES AMELIORATIONS APORTEES AUX GV CONCERNANT L'INTEGRITE DE LA DEUXIEME BARRIERE.

- 5.1. - Conception
- 5.2. - Matériaux
- 5.3. - Procédés de fabrication
- 5.4. - Recherche et développement en cours

6. - LES PROCEDES DE PREVENTION D'ENDOMMAGEMENT ET DE REPARATION DES FAISCEAUX TUBULAIRES.

- 6.1. - Traitement par microbillage
- 6.2. - Traitement thermique des cintres de petits rayons
- 6.3. - Manchonnage des tubes dans la zone de la plaque tubulaire
- 6.4. - Remplacement d'une portion complète de tube
- 6.5. - Revêtement électrolytique
- 6.6. - Bouchage

7. - CONCLUSION

## 1. - INTRODUCTION

Le tube de Générateur de Vapeur ( GV ), paroi de 1mm d'épaisseur seulement, constitue 70% à 80% de la surface du circuit primaire, deuxième barrière de confinement.

La sûreté du système PWR impose que le tube de GV conserve en toutes circonstances ( conditions normales, transitoires, incidentelles et accidentelles postulées ) une intégrité mécanique suffisante pour éviter sa rupture brutale et donc limiter la fuite excessive de fluide primaire.

Le respect de ce critère doit être assuré à tout instant de la vie des GV, ce qui justifie l'attention portée sur la santé des tubes de GV à tous les stades de leur fabrication, de leur assemblage puis surtout de leur exploitation.

La présentation portera spécialement sur les GV du parc français, avec quelques éclairages ponctuels sur l'expérience et la pratique internationale. Elle sera restreinte aux appareils dits " à recirculation ".

## 2. - LES MODES D'ENDOMMAGEMENT POTENTIELS.

### 2.1. - Généralités.

Notons tout d'abord que l'endommagement du tube de GV PVR à recirculation est dû, à hauteur de 90% des cas, aux phénomènes de corrosion affectant soit la paroi primaire soit la paroi secondaire, et seulement pour 10% des cas à des phénomènes mécaniques tels que l'usure locale et le choc d'un corps migrant. C'est dire la complexité de surveiller la santé individuelle de chaque tube ( pour respecter le critère de sûreté mentionné précédemment ) face à un problème d'endommagement générique comme la corrosion.

Historiquement, les modes d'endommagement se sont succédés par périodes de 4 à 5 ans, temps nécessaire pour prendre conscience puis connaissance des maladies, rechercher des remèdes et les appliquer en centrale. Ce sont, pour citer les plus anciennes maladies que la France a pu éviter grâce à l'expérience internationale :

- \* la corrosion secondaire ( intergranulaire ou sous contraintes ) au début des années 70
- \* l'amincissement généralisé ( wastage ) de 1973 à 1976
- \* la striction des tubes par les plaques entretoises ( denting ) de 1976 à 1980

Par contre, la corrosion sous contraintes par le fluide primaire a débuté depuis quelques années en France et constitue le grand souci sur nos GV pour les années à venir. Nous verrons quelques autres cas d'endommagement plus ponctuels mais qui ne font pas craindre pour la santé de tout un appareil.

2.2. - Les différents phénomènes de corrosion, non vécus en France.

Nous ne nous attarderons pas dans la description de ces phénomènes pour autant qu'ils ne se soient jamais manifestés en France.

\* Corrosion caustique sous contraintes et amincissement généralisé

Ces phénomènes sont intervenus au début des années 70 sur des installations d'origine Westinghouse et Combustion Engineering et se sont trouvés liés à la difficulté de contrôler la teneur en phosphates de l'eau alimentaire ainsi que les pollutions de cette eau. Ces difficultés ont conduit les exploitants américains au traitement volatil de l'eau alimentaire et ont conforté son utilisation dès le début d'exploitation des tranches françaises.

\* Striction des tubes, principalement au niveau des plaques entretoises ( denting )

Ce phénomène, maintenant bien connu, consiste en une corrosion localisée des plaques entretoises développant de la magnétite dans l'interstice tube plaque, au blocage de toute circulation d'émulsion dans cet espace et à la prolifération de l'oxyde de fer entraînant un étranglement progressif du tube. De plus le cuivre issu du poste d'eau constitue un élément catalyseur.

Au stade ultime de la maladie, le tube en très forte déformation plastique locale, fissure par corrosion primaire sous contrainte.

La meilleure protection actuelle porte avant tout sur la prévention du phénomène, par un contrôle strict de la chimie de l'eau secondaire. Le risque est particulièrement bien connu d'Electricité de France et complètement dominé

- \* Corrosion secondaire des tubes ( corrosion intergranulaire, corrosion caustique sous contraintes )

La maladie affecte un grand nombre de CV étrangers soit qu'il s'agisse d'appareils à dudgeonnage partiel dans la plaque tubulaire ( appareils dits " à crevasse ouverte " ), soit d'appareils ayant été imparfaitement nettoyés et présentant d'importants dépôts sur la face secondaire de plaque tubulaire. On observe un enrichissement prononcé de polluant dans la zone locale incriminée conduisant à la corrosion sous contraintes ( généralement résiduelles ) de l'Inconel 600 du tube.

Tous les CV français bénéficient d'un dudgeonnage intégral sur toute l'épaisseur de la plaque tubulaire, d'améliorations successives dans la thermo-hydraulique secondaire, et à ce jour, seul 1 CV de FESSENHEIM 1 ( CV n°3 ) a présenté quelques traces de corrosion secondaire en 1981 , phénomène complètement stabilisé depuis lors.

- \* Figures

Quelques centrales américaines ( spécialement *Indian Point 3* ) ont enregistré cet endommagement, associé à d'importantes entrées d'air et corrosion du condensateur . Il est inconnu en France, excepté sur quelques faisceaux neufs au stade de la fabrication, à un degré très minime et ayant fait l'objet d'expertise et de passivation.



### 2.3. - Les phénomènes de corrosion primaire rencontrés en France.

La corrosion primaire de l'Inconel 600 intervient dans les cas spécifiques de concomitance de 3 facteurs:

- \* un alliage de structure sensible
- \* un niveau de contraintes totales ( résiduelles et fonctionnement important )
- \* un environnement chimique néfaste à l'alliage ( le fluide primaire seul ou une concentration caustique )

Rappelons que la température constitue un paramètre important dans l'initiation et la cinétique du phénomène. Dans les gammes actuelles de température chaude, la cinétique double sensiblement tous les 7°C à 10°C pour le matériau sensible hypertrempé.

Cet endommagement est vécu en France dans la partie cintrée des tubes à très faible rayon de cintrage ( R1, R2 ) et dans les zones locales de transition de dudgeonnage ( dudgeonnage intégral, dudgeonnage complémentaire et recouvrements de pas ).

#### 2.3.1. - Tubes à faible rayon de cintrage.

---

La corrosion est apparue assez fréquemment sur des tubes de provenance Westinghouse, tant au plan mondial qu'en France, et a entraîné ces dernières années le bouchage systématique des tubes de premier rayon, soit à titre préventif soit après fuite liée à une corrosion primaire dans le raccordement entre les zones droite et cintrée. Depuis lors, le phénomène commence à se manifester, plus tardivement, sur les tubes de provenance Vallourec. Les études et expertises sont en cours mais devraient déboucher vraisemblablement sur le double rôle des contraintes résiduelles de cintrage et des contraintes de fonctionnement en présence d'un matériau sensible.

2.3.2. - Les zones de transition de dudgeonnage.

Les GV français utilisent tous ( exceptés les 3 appareils de FESSENHEIM 1 ) la technique du dudgeonnage mécanique intégral ( DI ) complété à partir de BUGEY 5 par une déformation complémentaire de la zone de transition finale ( procédé dit DAM ). Le procédé DI a été retenu pour son aptitude à fermer la crevasse tube-plaque de façon rigoureusement étanche dans toutes les zones de la plaque et dans tous les régimes de fonctionnement et pour apporter un complément de résistance mécanique à la soudure dans l'assemblage résistant. Le procédé complémentaire DAM a été appliqué pour obtenir une redistribution et une diminution des contraintes résiduelles en peau extérieure du tube dans la zone de transition du DI précédent.

En présence de tube Inconel 600 non traité et sensible, ces zones de transition sont affectées de microfissuration longitudinale primaire de longueur limitée ( 5 à 7 mm ) qui, au stade final caractérisé actuellement en laboratoire, oblique transversalement pour donner lieu à une fissure " en feston ". Cette configuration relativement fréquente est peu nocive comme on le verra plus loin et peut intervenir même en cas de morphologie normale de l'assemblage après une longue période d'incubation, dans le cas d'un matériau très sensible.

Il a été observé par contre des cas exceptionnels de fissuration circonscrite axisymétrique dans une configuration de double anomalie : ( dite de " DI long et DAM fort " ) préoccupante comme on le verra pour la sûreté. Une autre configuration ( dite de " DAM fort et court " ) est encore en analyse bien que moins critique que la précédente.

2.4. - Les autres phénomènes d'endommagement de tubes.

2.4.1. - La rupture par fatigue ou par usure rapide dans les cas de  
-----  
vibration à haute énergie.  
-----

La vibration à haute énergie, généralement de type fluide élastique, est due à des écoulements locaux à haute vitesse. Le phénomène est intervenu à plusieurs occasions dans le monde, notamment dans certains GV à préchauffeur à écoulement croisé et s'est traduit par des fuites de tubes par usure sur leur supportage au bout de quelques mois seulement.

2.4.2. - L'amincissement lent par usure au frottement du tube, soit sur  
-----  
un support, soit sur un tube voisin.  
-----

Le phénomène d'usure est très lent, fonction des couples de matériaux en présence, et peut s'initier même dans les cas de vibration turbulente de très faibles amplitude et énergie. Il est possible d'identifier 4 cas différents d'un tel amincissement lent :

\* l'usure au droit des plaques entretoises, phénomène peu fréquent dans le monde, inexistant en France, et qui se trouve souvent associé à une corrosion secondaire localisée du tube.

Ce problème peut par contre devenir important dans les cas d'augmentation sensible du jeu entre le tube et la plaque support ( par exemple dans les cas de lessivage chimique énergétique )

- \* l'usure au droit des barres antivibratoires, phénomène fortement dépendant des jeux de construction, des couples de matériaux en présence et à moindre titre du modèle de GV. Actuellement le phénomène s'est développé sur plusieurs tranches aux Etats-Unis et commence à apparaître ponctuellement en Europe ( Tihange 1, Bugey 2 ) . L'usure est localisée donc assez facilement repérable, de faible longueur, et ne pose donc pas de réel problème de sûreté.
  
- \* l'usure entre tubes voisins en cas de jeux insuffisants au montage ou de déformation locale excessive. Il existe très peu de cas de cette espèce et jusqu'à présent aucune fuite n'est intervenue pour cette cause.
  
- \* l'usure d'un tube par frottement sur une structure inerte voisine. La cinétique est généralement très lente, les tubes menacés sont ceux situés en périphérie du faisceau tubulaire et le programme d'inspection périodique prévoit l'inspection systématique de cette classe de tubes. Rappelons que plusieurs cas d'espèce ont été rencontrés aux USA et en FRANCE, généralement par des corps étrangers laissés par mégarde dans l'appareil après intervention, ainsi qu'en cas de décalage de bloc de rue d'eau à FESSENHEIM.

### 2.4.3. - Les corps migrants.

-----

Bien que le problème paraisse trivial, il constitue un problème délicat de rupture potentielle et brutale d'un ou quelques tubes. Il est par principe même difficile à anticiper.

Véhiculé par le fluide primaire, le corps migrant pose peu de problème de sûreté dans un GV : dans le cas d'un corps de fortes dimension et énergie, il reste prisonnier de la boîte à eau chaude et, malgré le martèlement des surfaces, il n'est d'aucun risque pour l'assemblage tube plaque; si sa dimension lui permet d'entrer dans un tube il risque soit de se coincer dans le cintre soit au pire de perforer localement le tube ce qui n'entraîne qu'une fuite primaire très limitée.

Le corps migrant secondaire pose plus de problème de sûreté car il peut être de grandes dimension et énergie. Le problème d'érosion corrosion des tubes en J a, par exemple, pris de l'importance en raison des conséquences de sûreté qu'il aurait pu avoir.

Les Autorités de sûreté françaises et mondiales accordent donc beaucoup d'attention au problème potentiel constitué par les corps migrants.

### 3. - LES CRITERES DE SURETE APPLIQUES AU TUBE GV.

Les différentes causes d'endommagement ( connues à ce jour ) ont été rapidement recensées. Il est capital de souligner qu'elles se classent très différemment en terme de sûreté selon

- \* leur nocivité intrinsèque vis-à-vis de la rupture brutale d'un tube
- \* leur facilité de détection et de quantification par les méthodes de contrôle non destructif en constante amélioration
- \* leur cinétique de développement entre deux campagnes successives d'inspection.

Bien que l'objectif fondamental de sûreté soit le même dans tous les pays, la " philosophie " des critères de sûreté appliqués varie comme on va le voir d'un pays à l'autre.

#### 3.1. - Conception.

En application des codes de conception et fabrication applicables dans les différents pays ( ASME aux USA, RCCM en FRANCE etc ), le tube de GV fait l'objet d'une analyse de comportement dans les conditions conventionnelles ( calcul, normales et perturbées, incidentelles, accidentelles, épreuves ). Ces codes sont sensiblement équivalents dans leur principe et consistent à vérifier le respect de critères limites sur un tube sain aux caractéristiques mécaniques et dimensionnelles minimales.

Il convient de souligner qu'en conditions accidentelles ( dites de 4ème catégorie ) les chargements mécaniques limites sont assez vite atteints et qu'il existe, dans ces différents codes, des alternatives de justification reposant sur l'estimation de comportement en grande déformation.

### 3.2. - Limite technique d'exploitation adoptée en FRANCE.

Face aux différents modes d'endommagement déjà cités et compte tenu de " l'effet palier " utilisable en FRANCE ( fournisseur unique, exploitant unique ), les Autorités de Sécurité françaises ont accepté une exploitation reposant sur le principe de la " fuite avant rupture " complété par l'élimination préventive des configurations ne respectant pas ce critère et par le suivi renforcé d'appareils dits " précurseurs." Cette position s'accompagne d'un effort constant d'Electricité de France pour mettre au point et qualifier des méthodes d'inspection non destructives ( CND ) capables de quantifier chaque type de défaut. Chaque fois qu'une telle méthode n'est pas disponible, le recours à des prélèvements de tubes in situ permet d'assurer un suivi statistique de la cinétique d'endommagement.

Le principe fondamental du critère de " fuite avant rupture " repose sur le fait que les différents défauts pouvant affecter un tube ( fissuration simple ou multiple, longitudinale ou circonférentielle, amincissement, piqûres etc.....) traversent la paroi et entraînent donc une fuite primaire secondaire mesurable et quantifiable, avant que les dits défauts n'atteignent une taille géométrique critique qui entraînerait la rupture brutale complète d'un tube dans la condition accidentelle la plus sévère pour le tube ( rupture de tuyauterie vapeur, pleine pression primaire 173 bars à chaud ). Outre la connaissance précise des tailles critiques mentionnées, le principe repose donc sur :

- \* la disponibilité de méthodes CND capables de quantifier chaque type d'endommagement
- \* la connaissance préalable des méthodes d'endommagement
- \* la connaissance des cinétiques par mode d'endommagement

Ces 3 critères justifient le fait que le critère de fuite avant rupture se trouve complété par des analyses et contrôles préventifs.

### 3.3. - Limites techniques d'exploitation adoptées à l'étranger.

Les critères utilisés à l'étranger sont marqués par la multiplicité des concepteurs fabricants d'une part, des exploitants d'autre part et par la diversité des modèles de GV et des conditions d'exploitation. Cette situation n'a pas permis aux dites Autorités de Sûreté ( et tout spécialement à la NRC ) d'aller très loin dans le sens du critère de " fuite avant rupture " renforcé ou de l'exploitation à " débit de fuite contrôlé ", et de s'en tenir à des critères plus conventionnels. Pour les USA, la NRC requiert un endommagement limité à 40% de l'épaisseur de paroi apprécié par CND qualifié, ainsi qu'un renforcement de la population statistique de contrôle et de la fréquence pour un appareil commençant à présenter certain type d'endommagement. Par contre l'exploitation de la tranche n'est pas interrompue tant que la fuite détectée ne dépasse pas une valeur limite ( de l'ordre de 70l/h pour le critère de base ).

Cette approche peut apparaître comme très limitative quant à la taille du défaut maximal admissible, et au contraire peu apte à piéger les nouveaux endommagements.

Dans le cas du JAPON, les Autorités de Sûreté requièrent outre le critère limitatif de 40% ci-dessus, un arrêt systématique et une recherche de défaut dès l'apparition d'une fuite primaire secondaire. Cette réglementation est particulièrement contraignante et conduit à un bouchage important de tubes.



#### 4. - ELABORATION ET JUSTIFICATION DES CRITERES FRANCAIS DE SURETE.

L'exploitation sûre du parc français de GV repose sur

- \* la surveillance à l'arrêt par des méthodes de contrôle non destructif qualifiées et adaptées aux défauts recherchés, sur un échantillonnage statistique tournant ( éventuellement renforcé )
- \* la surveillance en fonctionnement, avec différents grades de suivi
- \* la connaissance des tailles critiques de défauts et des débits de fuite correspondants, fonctions de l'emplacement du défaut dans le faisceau tubulaire
- \* la connaissance et le suivi des cinétiques d'endommagement ( notamment par le principe des GV précurseurs )
- \* l'identification et la caractérisation de nouveaux modes d'endommagement dès qu'ils apparaissent
- \* l'élimination préventive des défauts géométriques ou autres, qui ne respecteraient pas la règle de " fuite avant rupture "

L'ensemble de ces précautions constitue par sa cohérence la règle française d'exploitation. On verra par la suite qu'elle s'applique aux faisceaux tubulaires proprement dits, mais aussi aux divers procédés de réparation.

#### 4.1. - Méthodes de contrôle non destructif.

Les tubes de GV sont contrôlés par sondes à courants de Foucault multifréquences, soit de type axial intégrant l'état d'une section droite de tube, soit de type long et tournant permettant en expertise locale d'analyser les différentes génératrices du tube. Les signaux sont interprétés soit en mode absolu, soit en mode différentiel.

Ces techniques sont en pleine évolution; des sondes de nouveaux types sont en développement afin de saisir et quantifier de nouveaux défauts ou de mieux discriminer les défauts parmi les signaux parasites. De façon générale, on peut dire que les méthodes industrielles actuelles discriminent et quantifient les défauts présentant une discontinuité brutale ( pour autant que cette discontinuité ne se cumule pas à une autre discontinuité géométrique ou métallurgique par exemple ) telle que amincissement local, fissure simple ou multiple, piqure etc...L'interprétation est plus délicate quand il s'agit d'analyser la présence et la taille d'un défaut positionné au niveau d'une plaque entretoise ou d'une barre antivibratoire, ou surtout, en sortie de plaque tubulaire où la variation de forme géométrique du tube se combine à la variation de perméabilité de la plaque tubulaire.

Au stade actuel de la technique, les défauts circonférentiels axisymétriques restent très difficiles à déceler bien qu'un effort important continue à leur être consacré, de même que les amincissements très progressifs ou les zones de microfissuration diffuse comme la corrosion intergranulaire.

#### 4.2. - Taille critique de défaut.

Un effort continu est consenti depuis 1975 par EDF et FRAMATOME pour connaître et interpréter le comportement mécanique d'un tube de GV en présence d'un ou plusieurs défauts, situés dans différentes régions de tube ( zone courante, épaisseur ou sortie de plaque tubulaire, altitude d'une plaque entretoise, d'une barre antivibratoire ...)

Cette action est menée comme une corrélation très étroite entre les modèles et théories de rupture, les maquettes d'éclatement sur défauts artificiels, les portions de tubes endommagés prélevés in situ et portés jusqu'à l'éclatement après expertise.

Un très grand nombre de configurations ont été testées puisqu'actuellement la base expérimentale française porte sur 900 maquettes environ.

Ont été actuellement quantifiés et modélisés :

- la nocivité comparée des divers types d'endommagement ( fissures, amincissement régulier ou non, piqûres, etc....)
- les défauts longitudinaux, circonférentiels, à 45°
- les défauts traversants et non traversants
- l'influence d'un supportage local tel que plaque entretoise percée ou brochée, barre antivibratoire
- l'influence d'une flexion locale ou au contraire d'une limitation de déplacement, de l'effet local de plaque tubulaire
- l'influence des contraintes thermiques telles qu'un choc froid
- certaines combinaisons de défauts telles que les couronnes de fissures longitudinales.

D'autres programmes continuent en ce moment même :

- les défauts pseudo alignés
- l'influence du cintrage des tubes
- la combinaison de fissuration longitudinale et d'amincissement
- la comparaison de l'alliage 698 et de l'alliage 600

Cet effort place la FRANCE a un haut niveau de connaissance et de compétence dans l'appréciation du risque mécanique encouru par le tube de GV. L'effort se poursuit également dans le cadre des solutions de prévention d'endommagement ou de réparation de tube telles que microbillage ou micromartelage de la peau, revêtement électrolytique, manchonnage etc.....

#### 4.3. - Débits de fuite associés aux défauts traversants.

La connaissance de ce paramètre est indispensable en vue d'établir une règle d'exploitation, visant à associer la mesure en continu d'un certain débit à une taille de défaut supposé unique ( cas le plus sévère en terme de sûreté ). Là aussi la démarche est double, reposant tant sur des calculs théoriques d'aire de brèche puis de débit de fuite associé, que sur des mesures expérimentales sur tubes manchettes ou sur tubes prélevés in situ.

La difficulté est grande dans le cas des petites fissures de corrosion ( de l'ordre de 3 à 5mm seulement ) car la dispersion des débits est grande. Par chance la corrélation devient très satisfaisante pour les grandes fissures ( de l'ordre de 10 mm ) et notamment au voisinage de la taille mécanique critique ( environ 15 mm, valeur légèrement variable selon le matériau, les conditions de fonctionnement etc...) Cette connaissance a permis de fixer une limite à l'exploitation de tranche sur un critère de fuite de 70l/h environ ( cas de fissure simple ). Cette limite doit être abaissée pour des cas d'endommagement plus complexes tels qu'une fissure débouchant dans une zone amincie de tube par exemple.

#### 4.4. - Cinétique d'endommagement - Notion de GV " précurseur ".

Dans la quasi totalité des cas, la vérification est obtenue in situ par le contrôle non destructif ( sonde axiale ou sonde longue tournante ). C'est le cas notamment pour le cas des fissures longitudinales de corrosion, les amincissements localisés ( barres antivibratoires, plaques de préchauffeur à l'étranger ) ou de grande longueur ( contact entre deux tubes ) .

Ces phénomènes d'endommagement font l'objet de modélisations théoriques et de nombreux essais de laboratoires permettent soit d'asseoir les modélisations, soit de les remplacer dans le cas de la corrosion sous contraintes, non encore modélisée .Là encore, l'effort de modélisation est essentiel pour établir un plan statistique et une périodicité du contrôle non destructif des faisceaux tubulaires.

De plus l'existence d'un palier nucléaire français 900MWe de 28 + 6 tranches, soit 102 GV modèle 51 sur le sol français ( et par la suite du palier 1300 MWe de 20 tranches, soit 80 GV modèle 68/19 ) permet d'accroître la connaissance sur la cinétique propre à chaque type de défaut, grâce au suivi systématique et renforcé d'appareils dits " précurseurs ".

Sur des composants identifiés, représentatifs chacun d'un mode d'endommagement, il est conduit aux arrêts de tranche un programme spécial de contrôle ( les autres appareils du parc français étant eux mêmes comparés à ceux-ci ). En 1986, 6 GV ont été retenus à cette fin, et nous citerons à titre d'exemple :

- \* GV3 de FSH 1 pour la spécificité de l'expansion à l'explosif
- \* GV2 de BG 3 pour la fissuration primaire en zone de transition de dudgeonnage mécanique seul
- \* GV2 de BG 5 pour la fissuration primaire de tubes ayant eu un dudgeonnage complémentaire sur site
- \* GV2 de DA 1 pour la fissuration multiple, spéciale à cette tranche particulière

etc....

Cette notion d'appareil précurseur est redéfinie annuellement entre Electricité de France et l'Autorité Administrative française.

#### 4.5. - Prélèvements de tubes in situ.

Ce niveau ultime de contrôle a déjà été utilisé 80 fois environ en FRANCE, dans presque tous les cas pour évaluer les phénomènes de corrosion en sortie de plaque tubulaire, et pour 3 tubes très récents, en prélevant le spécimen à l'altitude de la lère entretoise inférieure. Ces prélèvements ont pour but selon les cas

- \* de se substituer, au moins partiellement, à une méthode de CND insuffisant fiable ou qualifiée
- \* d'identifier la nature et les causes de l'endommagement
- \* de corréler sur vrais défauts les signaux réponses de CND avec le type et la grandeur réels des défauts
- \* de suivre la cinétique d'endommagement.

La tranche de DAMPIERRE 1 est actuellement celle qui fait l'objet du contrôle le plus renforcé par prélèvements.

#### 5. - LES AMELIORATIONS APORTEES AUX GV CONCERNANT L'INTEGRITE DE LA DEUXIEME BARRIERE.

Les modifications apportées régulièrement à la conception, aux matériaux ou aux procédés de fabrication ont eu presque toutes pour objectif d'améliorer le comportement et la durée de vie des faisceaux tubulaires. Ces améliorations ont fait l'objet de nombreuses présentations depuis plusieurs années, et nous ne reviendrons donc pas sur leur énumération exhaustive déjà bien connue. Nous nous bornerons aux plus récentes.

### 5.1. - Conception.

- \* utilisation de plaques entretoises brochées à portées planes sur le tube pour éliminer tout risque de surchauffe et assèchement local ainsi que de rétention de produits de corrosion ( GV 73/19 )
- \* incrémentation des longueurs droites des tubes pour accroître les jeux entre tubes dans le chignon
- \* utilisation d'un préchauffeur axial dans le GV 73/19 pour éliminer les sollicitations vibratoires excessives
- \* multiplication des ouvertures d'accès dans l'enceinte secondaire du GV73/19 pour augmenter les capacités d'inspection et de nettoyage du faisceau tubulaire.
- \* augmentation d'épaisseur des barres antivibratoires pour diminuer le degré de liberté global du chignon ( tous GV )

### 5.2. - Matériaux.

- \* poursuite d'utilisation de la nuance 13% Cr pour les plaques entretoises
- \* adoption de l'Inconel 690 traité thermiquement pour les tubes de GV à compter de la 19ème tranche 1300 MWe, 1ère tranche 1450 MWe, 4ème GV de Rechange type 51
- \* renforcement de l'épaisseur de chrome sur les barres antivibratoires.



### 5.3. - Procédés de fabrication.

- \* Analyse critique et renforcement des exigences de laminage pour limiter le bruit de fond induit lors des opérations ultérieures de CND par courants de Foucault
- \* Amélioration de procédé de nettoyage des alésages de plaque tubulaire avant tubage de l'appareil, par machine automatique de grenailage
- \* Analyse critique et amélioration du procédé de nettoyage interne des tubes après dudgeonnage ( lavage et rinçage par machine automatique)
- \* Utilisation d'une machine automatique à dudgeonner ( dite " machine Bertin " ) assurant la fiabilité et la répétitivité des séquences ainsi que la systématisation des diagnostics de malfonctionnement
- \* Adoption d'une nouvelle méthode de montage des faisceaux et des barres, dite " tubage par nappes ". Le procédé consiste à monter alternativement une nappe de tubes puis une famille de barres. Il permet un contrôle à l'avancement des jeux entre tubes et barres, des jeux entre cintres concentriques; il autorise un léger épaissement des barres et supprime le risque d'endommagement ou déformation des tubes associé au montage final des barres dans le procédé précédent.

#### 5.4. - Recherche et développement en cours.

Ces actions pourront recevoir une application éventuelle en cas de résultats positifs soit sur de futures unités de remplacement, soit sur des tranches ultérieures du palier N4.

Citons :

- \* la recherche d'un nouvel outil de dudgeonnage mécanique permettant d'adoucir les zones de transition, de favoriser le recouvrement des pas et d'éviter le dudgeonnage complémentaire
- \* le développement de l'expansion hydraulique haute pression supprimant l'écroutissage superficiel du matériau
- \* la recherche d'un nouveau matériau constitutif des barres antivibratoires associé éventuellement à un changement du mode de fixation.

Signalons enfin une démarche plus globale, concertée entre EDF et FRAMATOME, d'étude d'un modèle de générateur de vapeur spécialement destiné au rééquipement des tranches françaises 3 boucles.

Ce modèle, actuellement dénommé " GV de Substitution " intégrerait toutes les améliorations décrites précédemment ainsi qu'une augmentation générale des marges de fonctionnement ( surface d'échange, stabilité, tassement de plan d'eau etc...). ce modèle pourrait être commandé par EDF au delà des 6 unités de type GV51B actuellement en cours de fabrication en tant qu'appareils de rechange.

6. - LES PROCÉDES DE PRÉVENTION D'ENDONNAGEMENT ET DE RÉPARATION DES FAISCEAUX TUBULAIRES.

6.1. - Traitement par microbillage.

Deux procédés de microbillage de la peau primaire des tubes ont été développés, qualifiés et mis en oeuvre :

\* l'un par projection de billes métalliques ( Shot Peening ) développé et mis en oeuvre par FRAMATOME;

\* l'autre par martelage à l'aide de billes collées sur des lanières ou drapeaux, développé par EDF et mis en oeuvre par Intercontrôle

Les deux procédés ont la propriété d'introduire de fortes contraintes de compression sur la peau intérieure du tube et par là même d'éviter l'initiation de fissures de corrosion sous tension. L'optimisation des procédés est destinée à protéger totalement la face primaire tout en limitant le niveau de contraintes de tension rajoutées en peau secondaire du tube. La mise au point du procédé a également porté sur le comportement ultérieur d'un tube déjà fissuré et subissant un micromartelage: cette opération ne permet pas de stopper complètement la propagation des fissures préexistantes mais à tout le moins, évite l'allongement des dites fissures et suspend l'initiation de nouvelles. Par ailleurs le procédé ne contrarie pas la règle de suivi du débit de fuite primaire = secondaire en fonctionnement. EDF a décidé l'application des procédés sur tous les tubes de GV fournis sans traitement thermique final de longue durée.

6.2. - Traitement thermique des cintres de petits rayons.

Pour lutter contre la corrosion primaire rencontrée principalement sur les cintres de rayon R1, un développement de procédé et d'outillage est en cours. Le choix définitif entre un traitement de courte durée visant à lutter essentiellement contre les contraintes résiduelles de cintrage, et un traitement de longue durée agissant à la fois sur la structure du matériau et la relaxation des contraintes n'est pas encore fait. Un tel procédé de traitement sera disponible en FRANCE courant 1987.

### 6.3. - Manchonnage des tubes dans la zone de la plaque tubulaire.

Une opération préindustrielle de manchonnage de 10 tubes à été réalisée en 1984 sur le GV3 de FESSENHEIM, selon la technique de manchonnage mécanique long. Elle a été prolongée par une automatisation de la mise en place des manchettes, une optimisation des joints mécaniques et de la longueur des manchettes autorisant ainsi une éventuelle intervention généralisée à la quasi totalité des tubes d'un GV en cas de nécessité. Cette technique a été très largement utilisée aux Etats-Unis non seulement en tant que méthode de réparation mais aussi comme prévention en abaissant très sensiblement la température locale de fonctionnement du tube. Les inconvénients de la méthode reposent sur la déformation plastique locale imposée au tube, a priori sensible, lors de la pose ainsi que sur la grande difficulté de contrôle du tube à travers la manchette ( notamment en cas de défaut circonférentiel ).

Le développement de méthodes alternatives par manchettes soudées est en cours et devrait aboutir pour fin 1987. La contrôlabilité des joints soudés tant au montage qu'en visite périodique reste un objectif important de ces programmes.

### 6.4. - Remplacement d'une portion complète de tube.

Ce procédé peut apparaître comme séduisant au niveau de son principe même. Il a été analysé et développé au laboratoire, a fait l'objet de quelques interventions unitaires de démonstration à l'étranger. Il est globalement de mise en oeuvre très longue et délicate, et n'a pas été retenu comme méthode réellement industrielle par EdF.

#### 6.5. - Revêtement électrolytique.

Différentes méthodes de revêtement par dépôt électrolytique de nickel pur existent en laboratoire et ont fait l'objet de démonstration en centrale à l'étranger. Une telle démonstration est également envisagée en FRANCE. Ces procédés permettent un pontage parfait des fissures préexistantes et selon l'épaisseur de nickel déposé, il est possible de balayer toute la plage de fonctions allant de la simple étanchéité en couche mince ( de l'ordre de  $50 \mu$  ) au renforcement mécanique total du tube pour une épaisseur de 300 à 400  $\mu$  . Le développement se poursuit aux plans technologie, inspection et contrôle, justification du comportement mécanique de l'ensemble réparé.

#### 6.6. - Bouchage.

C'est le procédé d'intervention le plus connu et le plus courant. La technique la plus pratiquée en FRANCE est celle du bouchon dit " mécanique ", dont la mise en place vient d'être complètement automatisée. Les développements actuels portent tout spécialement sur le principe d'un bouchon démontable, permettant d'observer préventivement un tube pour le remettre ultérieurement en service après réparation ou contrôle complémentaire. Un tel bouchage sera qualifié et disponible en milieu d'année 87.

6.7. - Citons enfin pour mémoire, le stade ultime de la réparation consistant à remplacer le faisceau tubulaire, et en l'espèce, la partie inférieure complète du GV. Une telle opération a déjà été réalisée une dizaine de fois dans le monde. Les procédés élémentaires d'intervention et leurs outillages ont été étudiés et mis au point depuis deux ans par EDF et FRAMATOME. Sous réserve de décisions opérationnelles, l'opération serait envisageable en FRANCE vers fin 87.

## 7. - CONCLUSION

Malgré la diversité des défauts observés de par le monde, la complexité des technologies de fabrication et de contrôle des tubes et surtout l'importance considérable de la population à surveiller, il semble possible de tirer une conclusion optimiste sur la sûreté d'exploitation des faisceaux de GV français.

Il existe par ailleurs une large gamme d'améliorations, de précautions d'emploi, de procédés préventifs voire de procédés de réparation qui à chaque stade, permettent d'influer sur la durée de vie des appareils.

L'ensemble des travaux qui ont été résumés ici rapidement conforte la situation globalement satisfaisante du parc de GV français.