Document de session préparatoire à la réunion du Conseil Sup de la Sûreté et 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
Dimensions générales		
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
Faisceau de tubes		
Surface d'échange	4 700 m^2	6 900 m^2
Nombre de tubes en U	3 361	5 342
Diamètre des tubes (extérieur)	22,2 mm	19 mm
Caractéristiques de la vapeur		
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 (N_4).

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 poura 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} occurence 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)

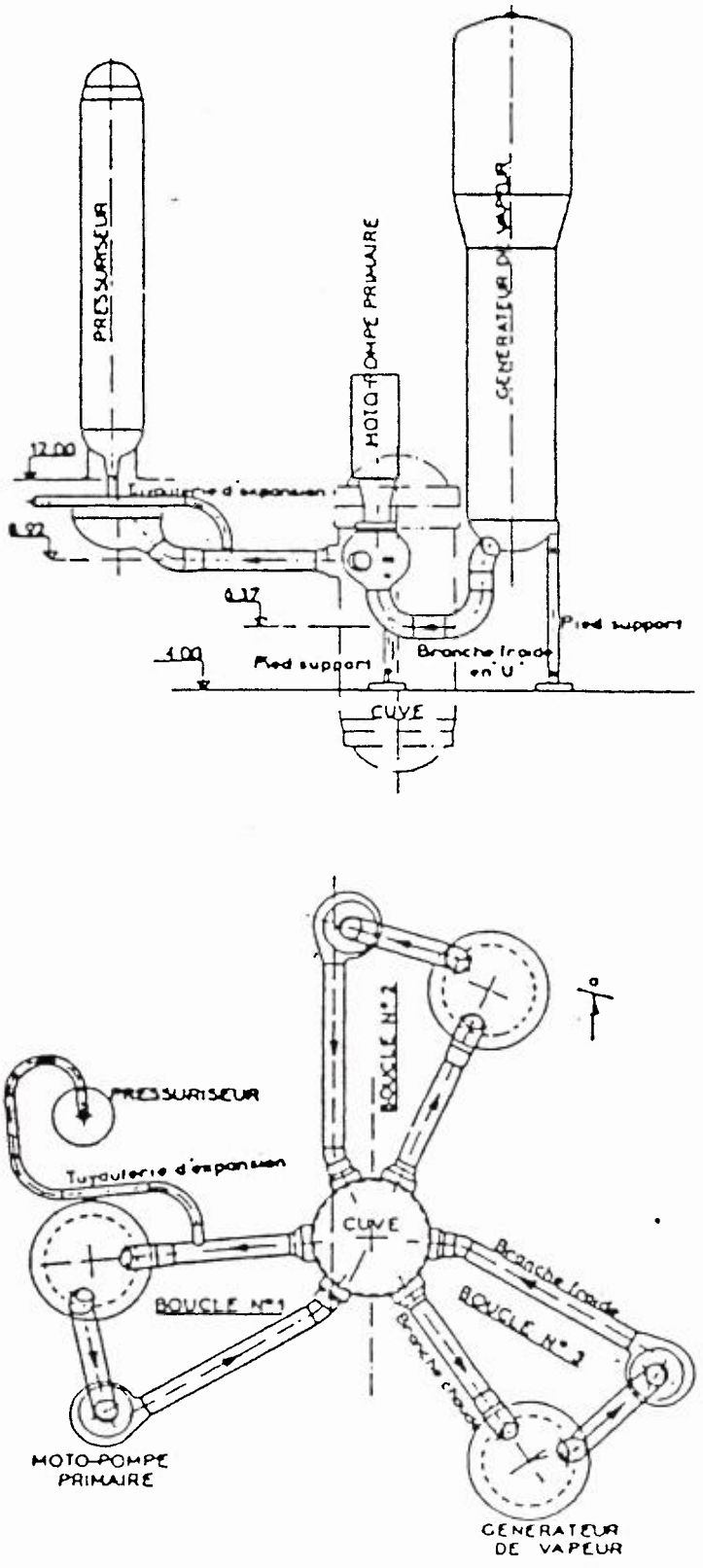
- formation des opérateurs.

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.

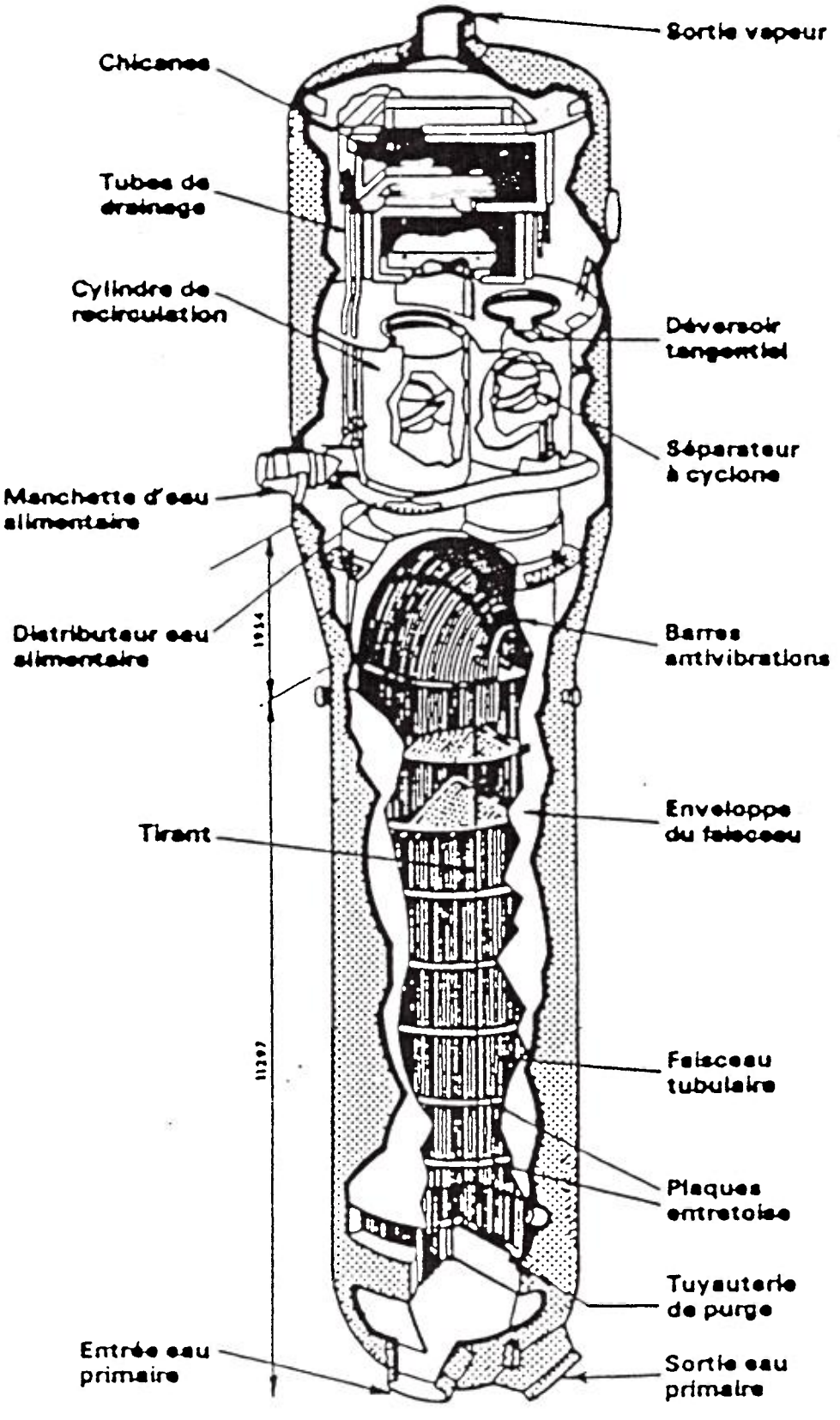
C'est pourquoi la nécessaire bonne préparation à l'intervention ne doit en aucun cas conduire à un relâchement des efforts de prévention.

- FIGURE A -

Circuit primaire PWR 900 (3 boucles)



- FIGURE 8 -


Sortie vapeur
Chicanes
Tubes de drainage
Cylindre de recirculation
Déversoir tangentiel
Séparateur à cyclone
Manchette d'eau alimentaire
Distributeur eau alimentaire
Barres antivibrations
Enveloppe du faisceau
Tirant
Faisceau tubulaire
Plaques entretoise
Tuyauterie de purge
Entrée eau primaire
Sortie eau primaire
1934
11307

LES GENERATEURS DE VAPEUR DES CENTRALES REP

PREMIERE PARTIE

Les types de dégradations observées

(1 - Endommagement par usure (page 2)

(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 incidentelle d'un corps étranger dans les parties sècondaires 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 suvi 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'Inconel 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 utlisés 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.

.../...

4.3.4. Remplacement de générateur de vapeur

Le remplacement de générateur de vapeur est la plus grosse opération de maintenance envisagée actuellement sur une centrale nucléaire. Des remplacements ont déjà été effectués à l'étranger, en particulier aux Etats-Unis. EDF ~~envisage~~ a décidé de remplacer les générateurs de vapeur de DAMPIERRE 1 en 1990.

Le mode d'intervention retenu par EDF consiste à remplacer l'ensemble du générateur de vapeur après découpe des tuyauteries, en particulier des grosses tuyauteries primaires. Le soudage de celle-ci sur GV neuf sera effectué par un procédé automatisé avec suivi vidéo pour des raisons de dosimétrie. Le dossier d'étude de l'intervention sur le circuit primaire principal est actuellement dans sa phase terminale.

FIGURE 1

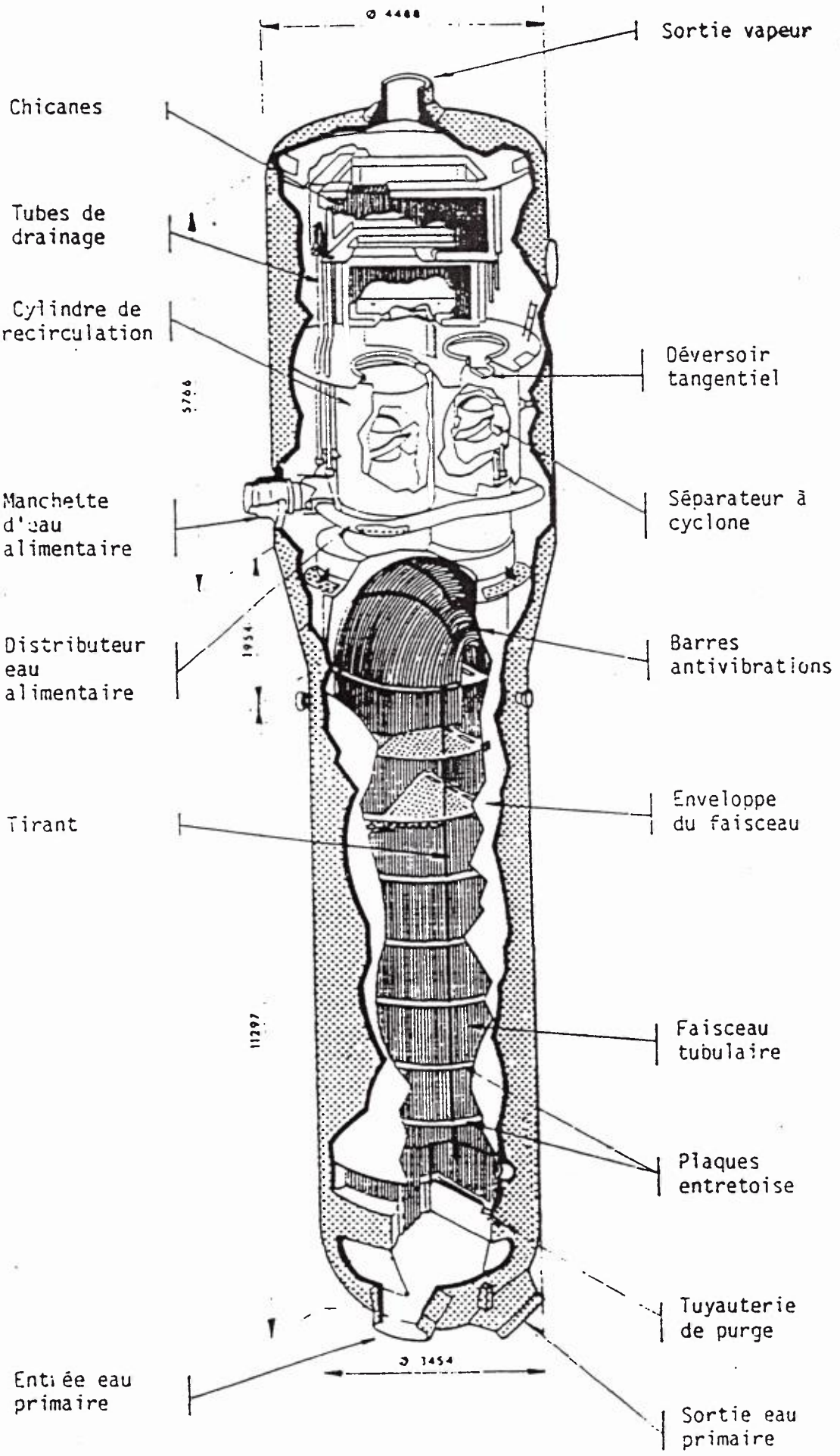

Ø 4488
Sortie vapeur
Chicanes
Tubes de drainage
Cylindre de recirculation
Déversoir tangentiel
5766
Séparateur à cyclone
Manchette d'eau alimentaire
Distributeur eau alimentaire
1954
Barres antivibrations
Enveloppe du faisceau
Tirant
11297
Faisceau tubulaire
Plaques entretoise
Tuyauterie de purge
Ø 3454
Entrée eau primaire
Sortie eau primaire

FIGURE 2

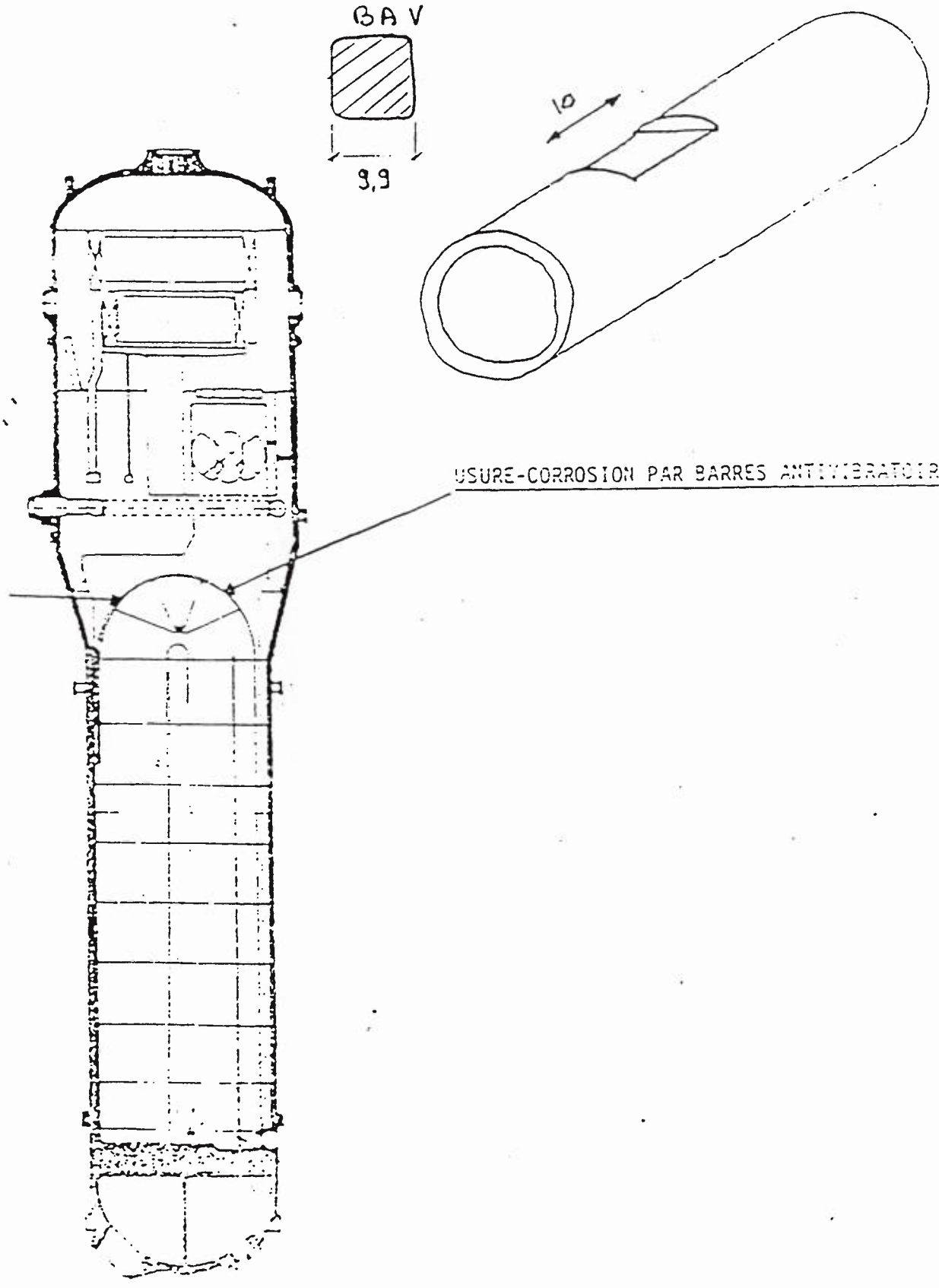


FIGURE 3

EVOLUTION DE LA FABRICATION DES PLAQUES ENTRETOISES

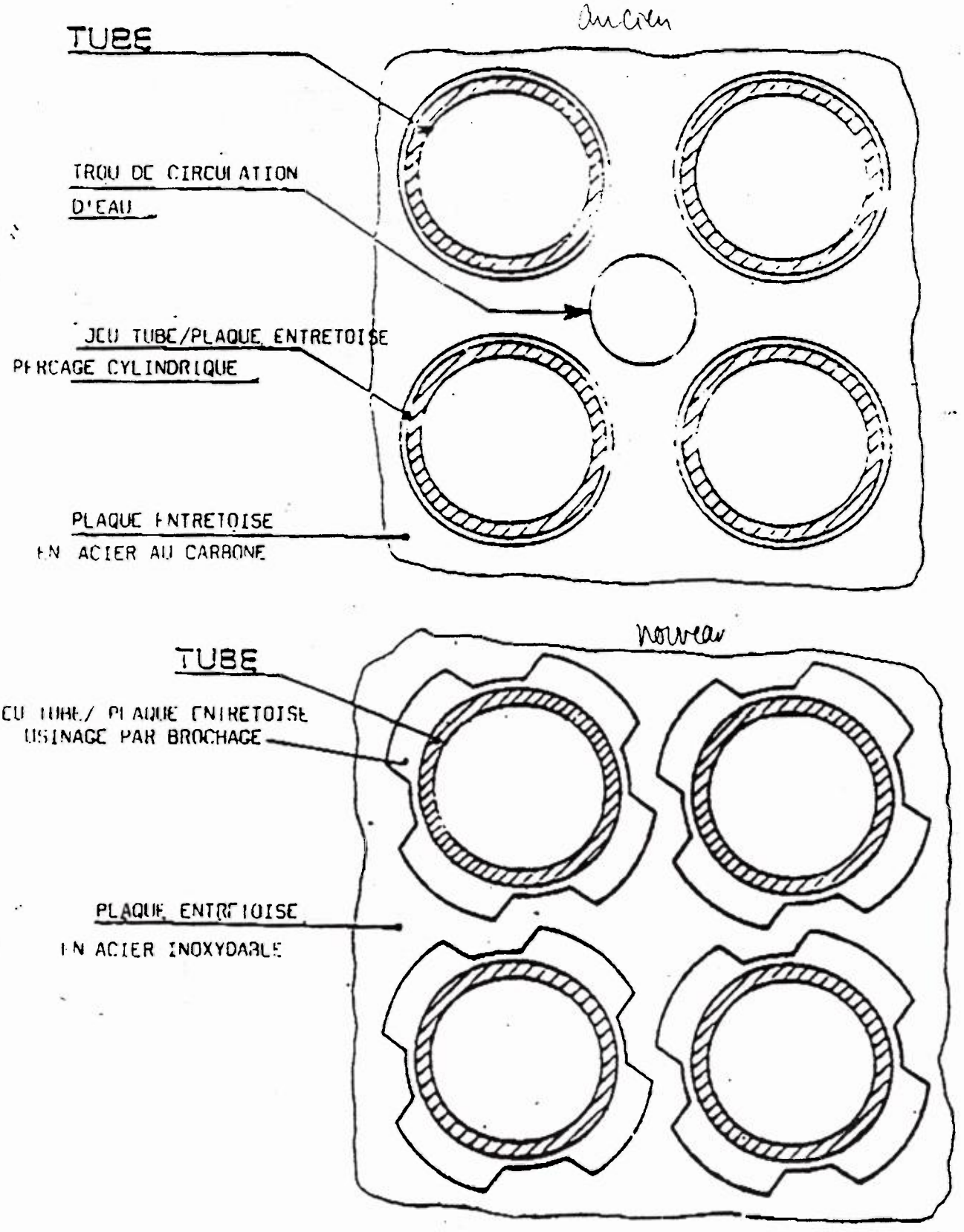
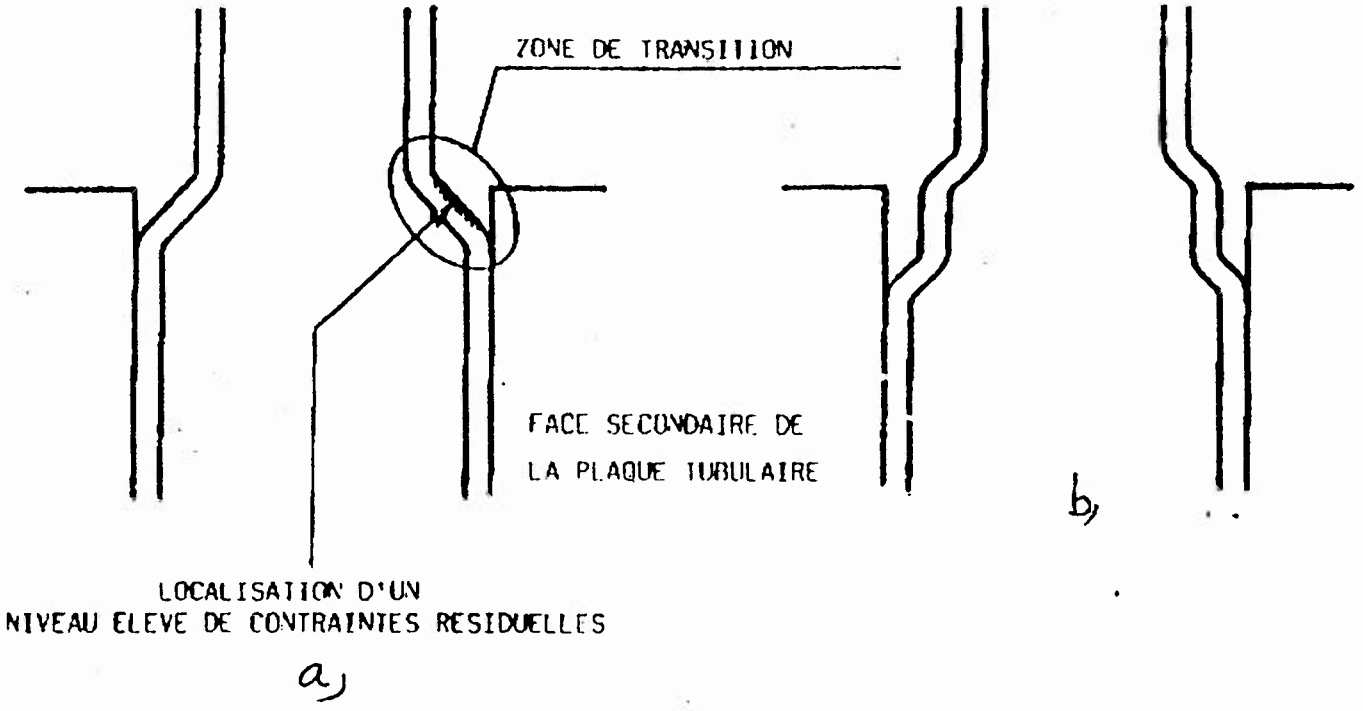


FIGURE 4



PROFIL DU TUBE APRES

a) DUDGEONNAGE MECANIQUE PROFOND

b) DUDGEONNAGE COMPLEMENTAIRE

FESSENHEIM 1 - G.V. 2 - TUBE L3 C28

FIGURE 5

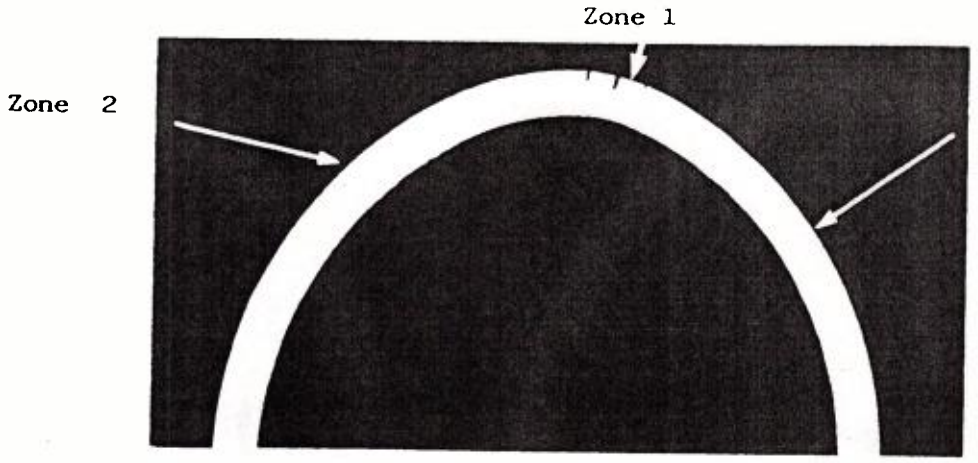
x 2

x 2

x 2

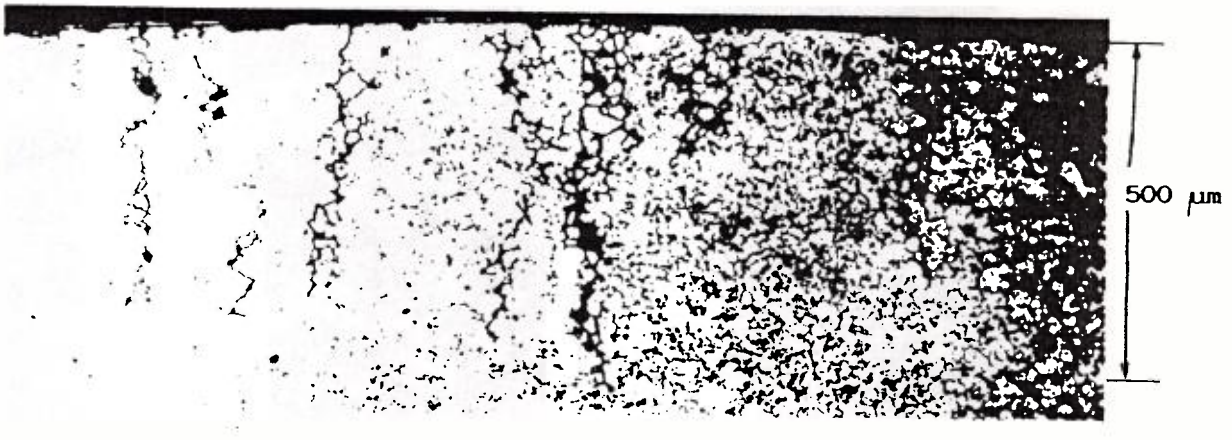
FESSENHEIM 1 - G.V. 2 - TUBE L18 C22

FIGURE 6

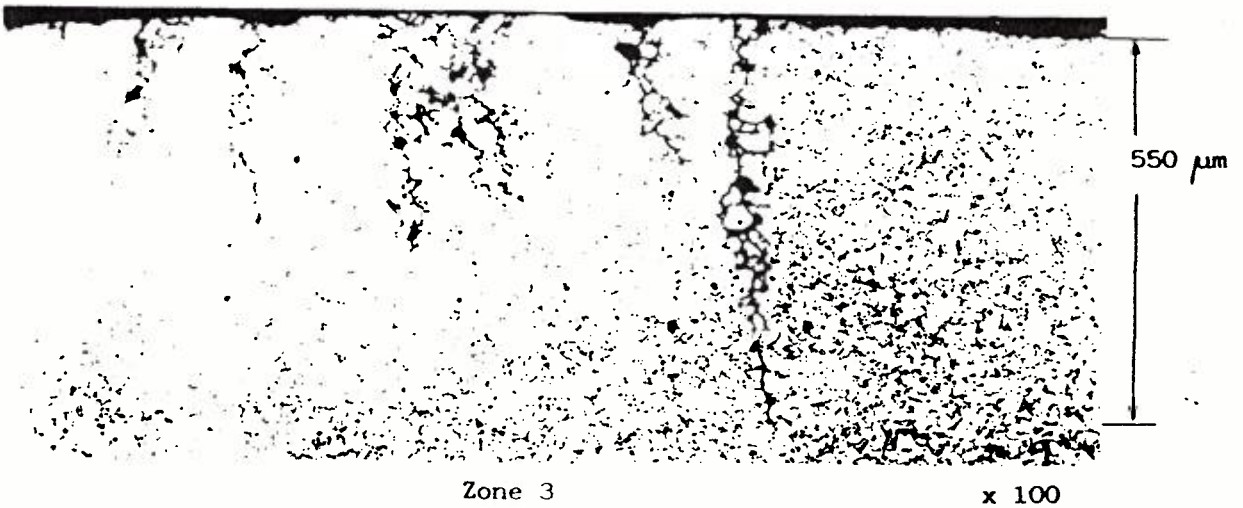


x 5

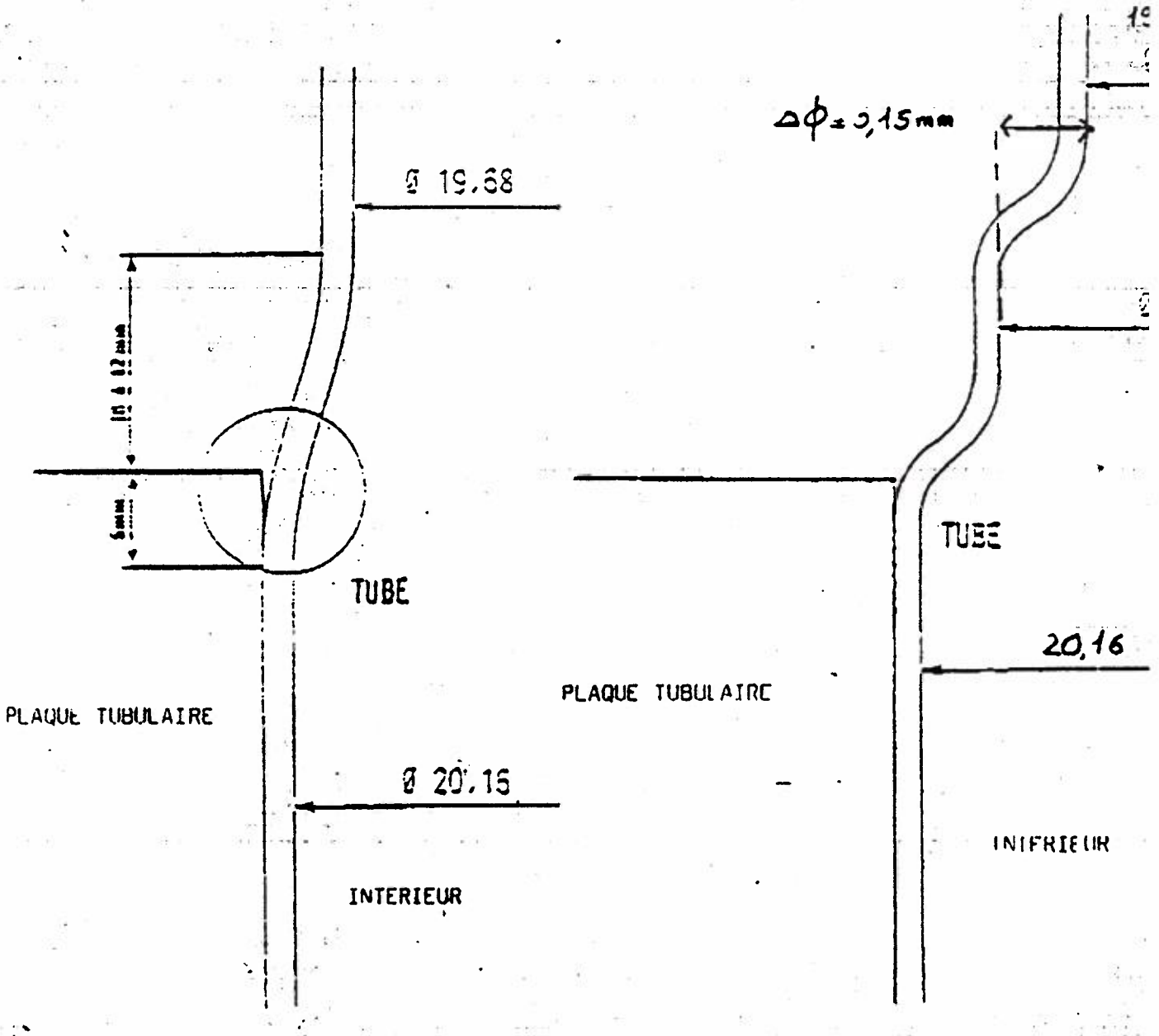
Zone 1 x 100



Zone 2 x 100



Zone 3 x 100



SANS DUDGEONNAGE COMPLEMENTAIRE

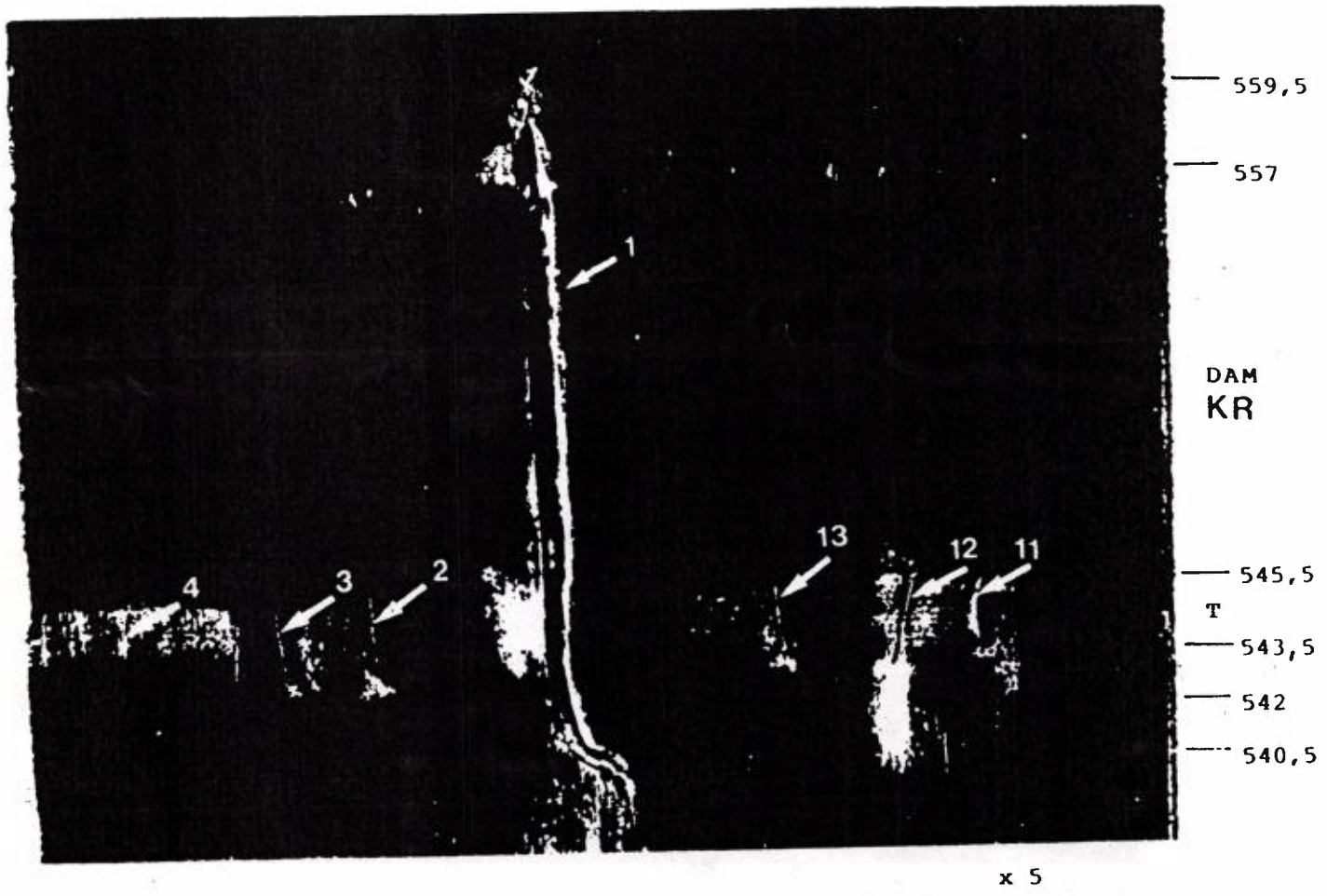
AVEC DUDGEONNAGE COMPLEMENTAIRE

COUPE DES TUBES AU NIVEAU DE LA ZONE DE TRANSITION DU DUDGEONNAGE AVEC ET SANS DUDGEONNAGE COMPLEMENTAIRE

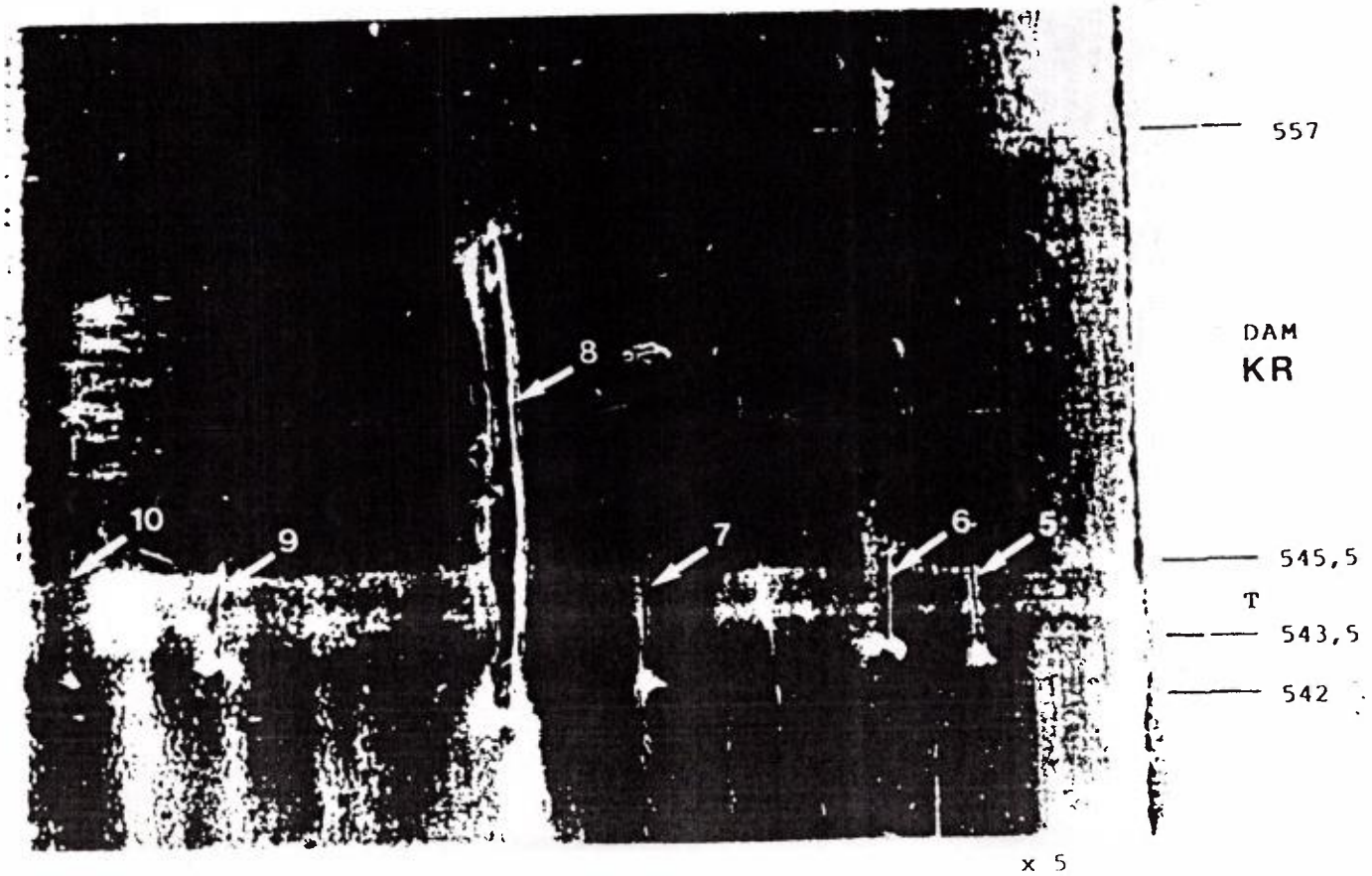
DUDGEONNAGE INTEGRAL
(FIGURE 8)

DUDGEONNAGE COMPLEMENTAIRE

(FIGURE 9)



x 5



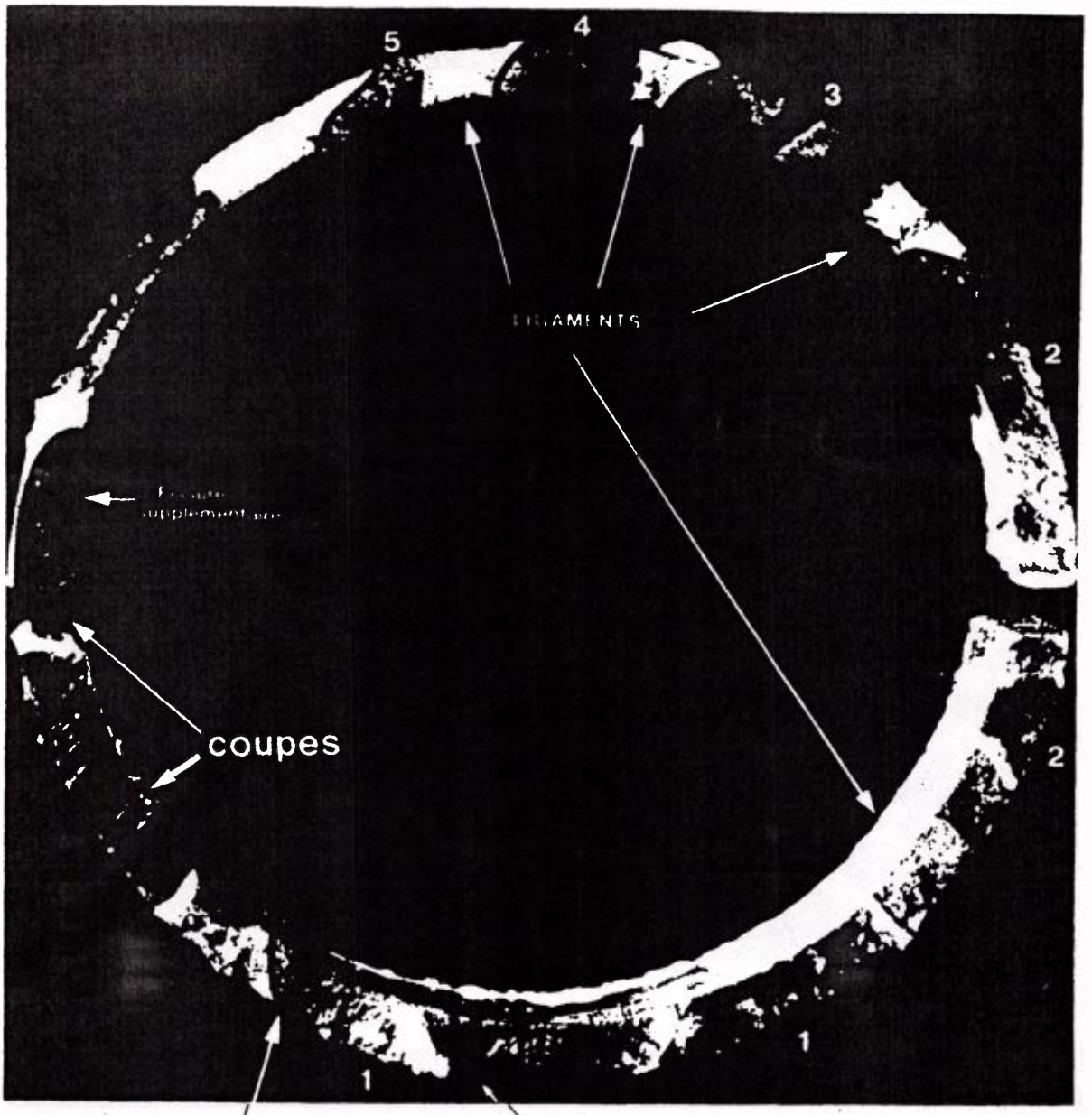
x 5

Cotes en mm

DUDGEONNAGE INTEGRAL
(FIGURE 8)

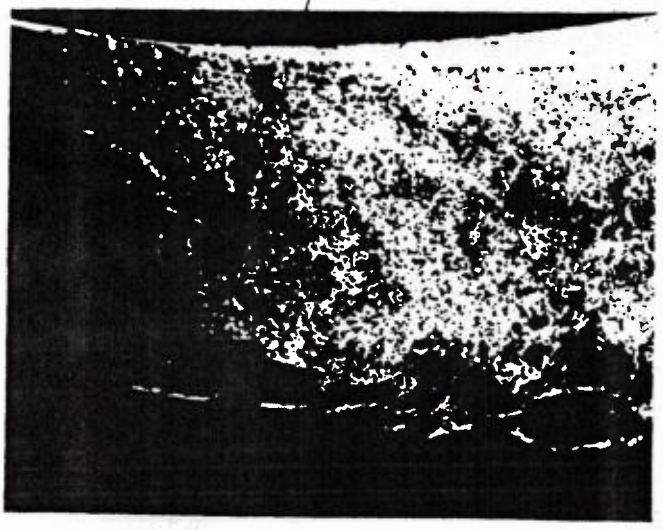
DUDGEONNAGE COMPLEMENTAIRE / FISSURE CIRCONFERENTIELLE

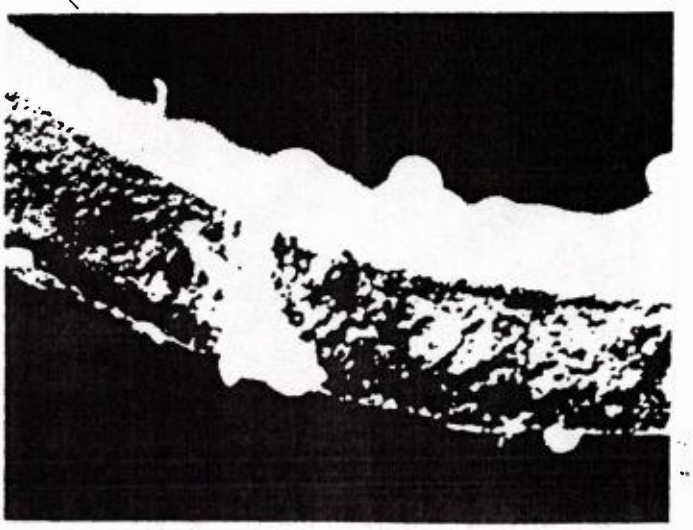
(FIGURE 11)



15x7

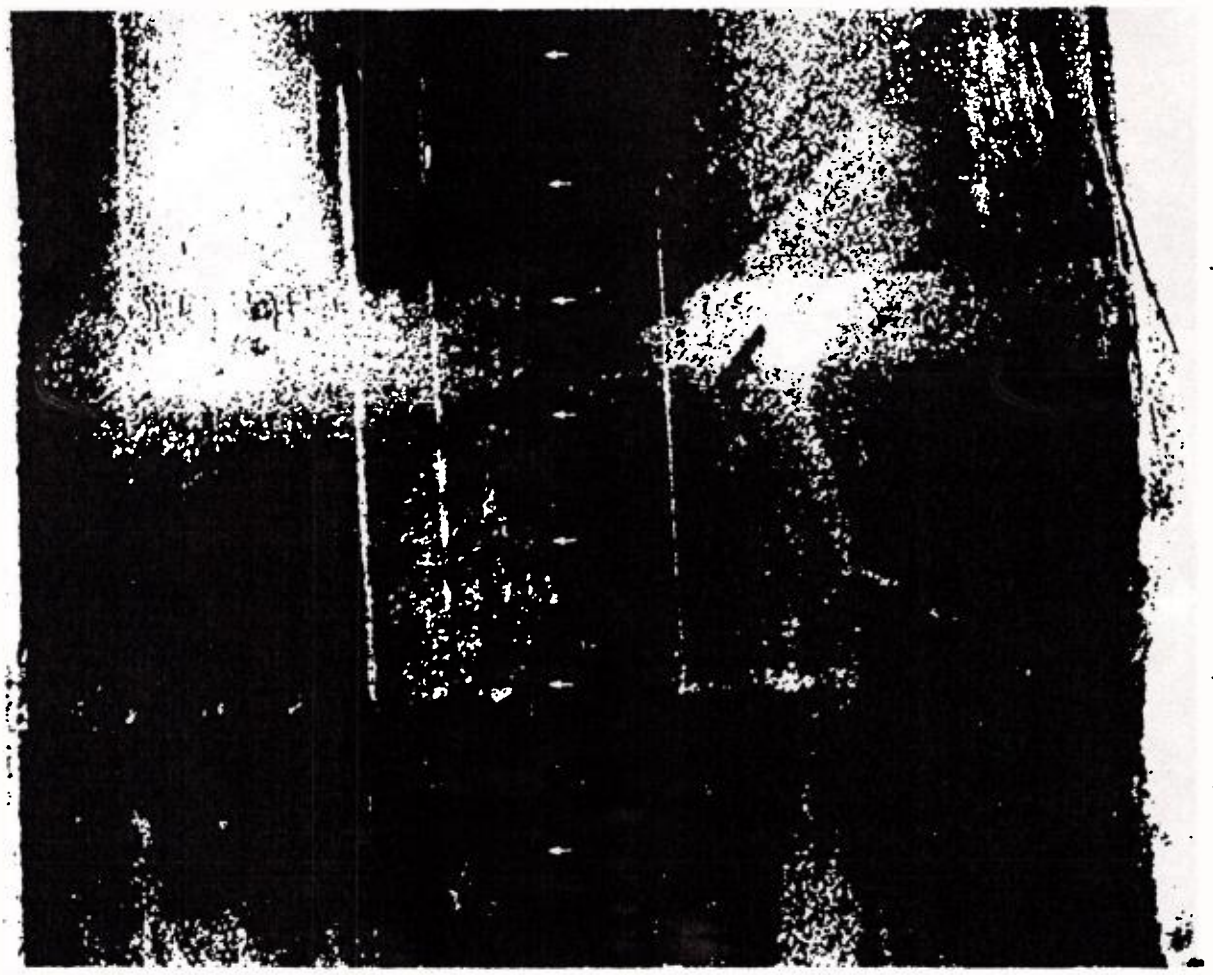
Examen au MEB



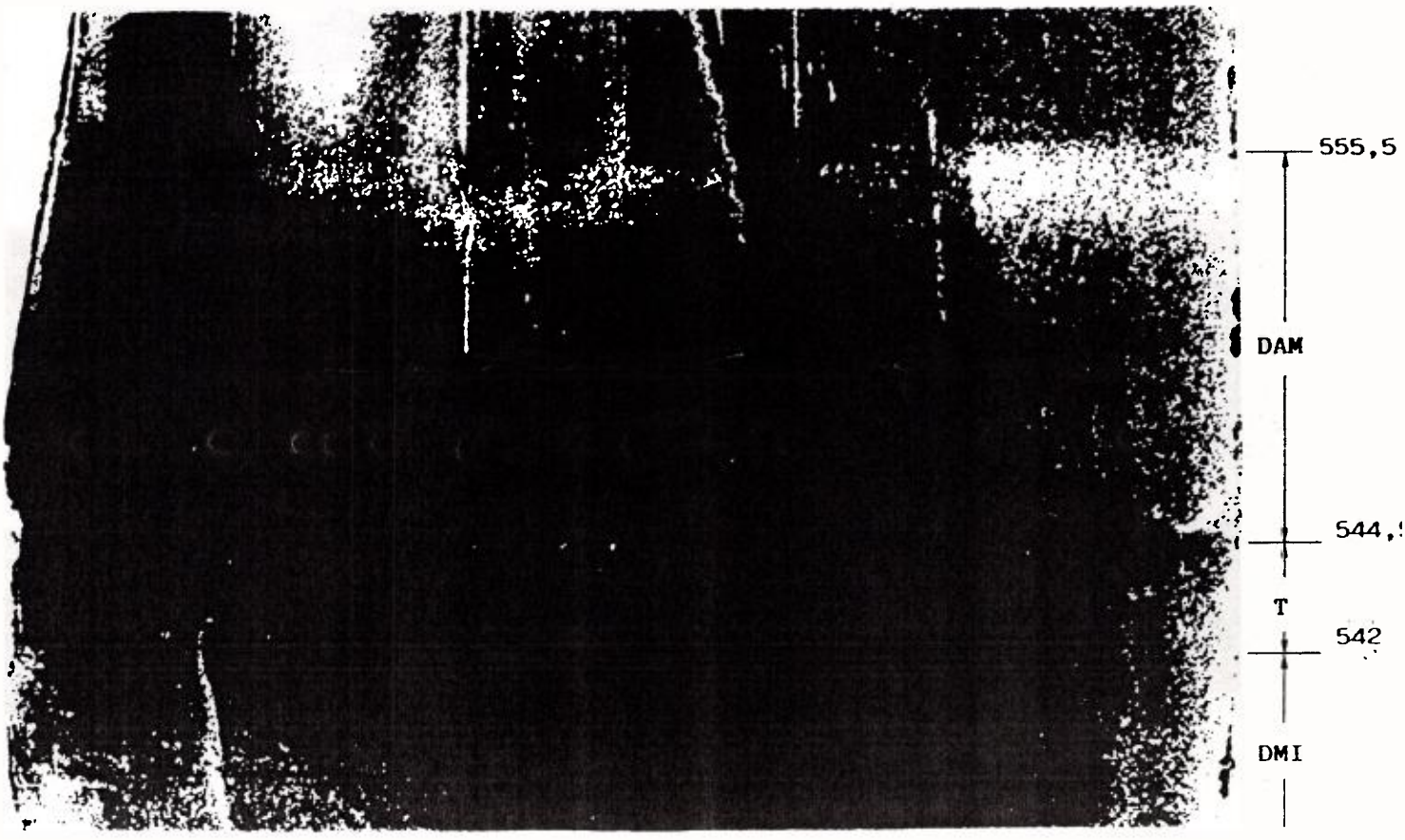


DUDGEONNAGE COMPLEMENTAIRE / DAMPIERRE 1

(FIGURE 12)

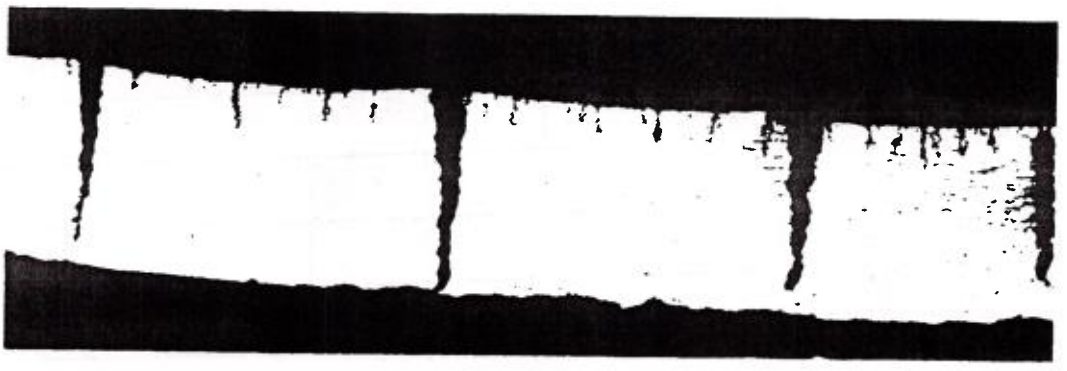


x 5

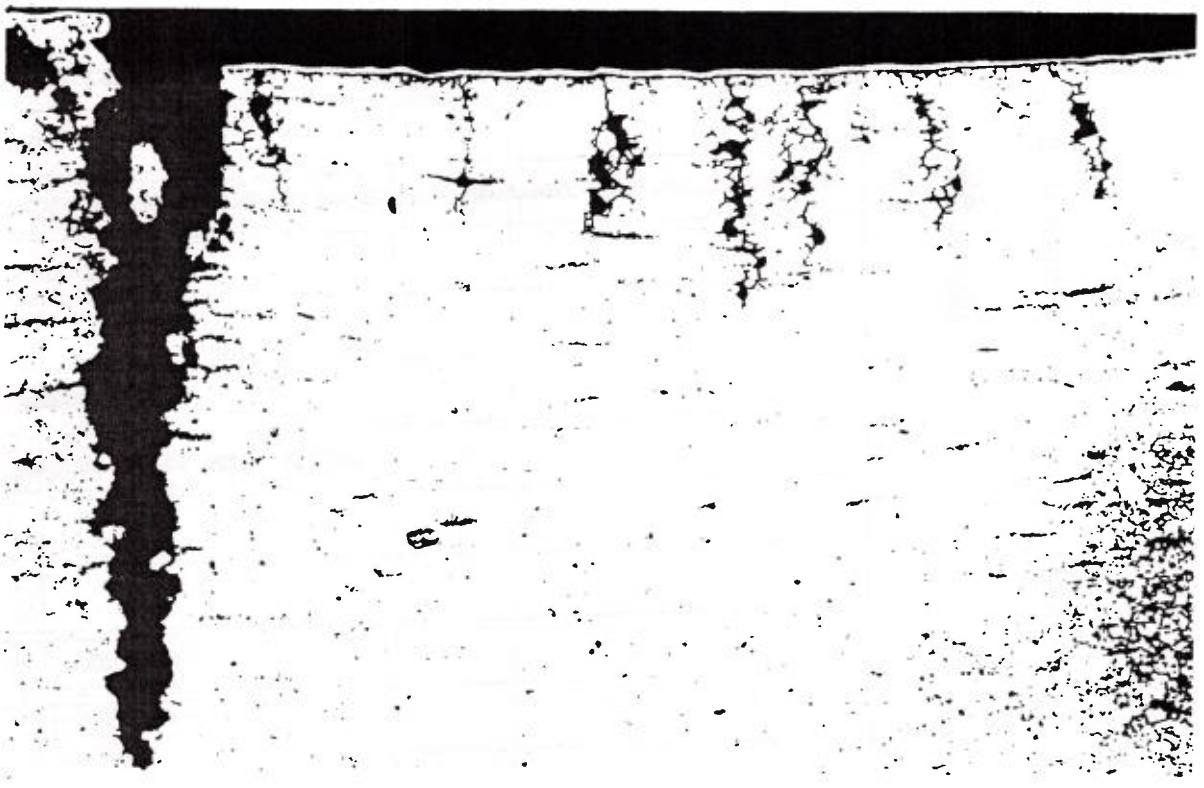


DUDGEONNAGE COMPLEMENTAIRE / DAMPIERRE 1

(FIGURE 13)



x 20

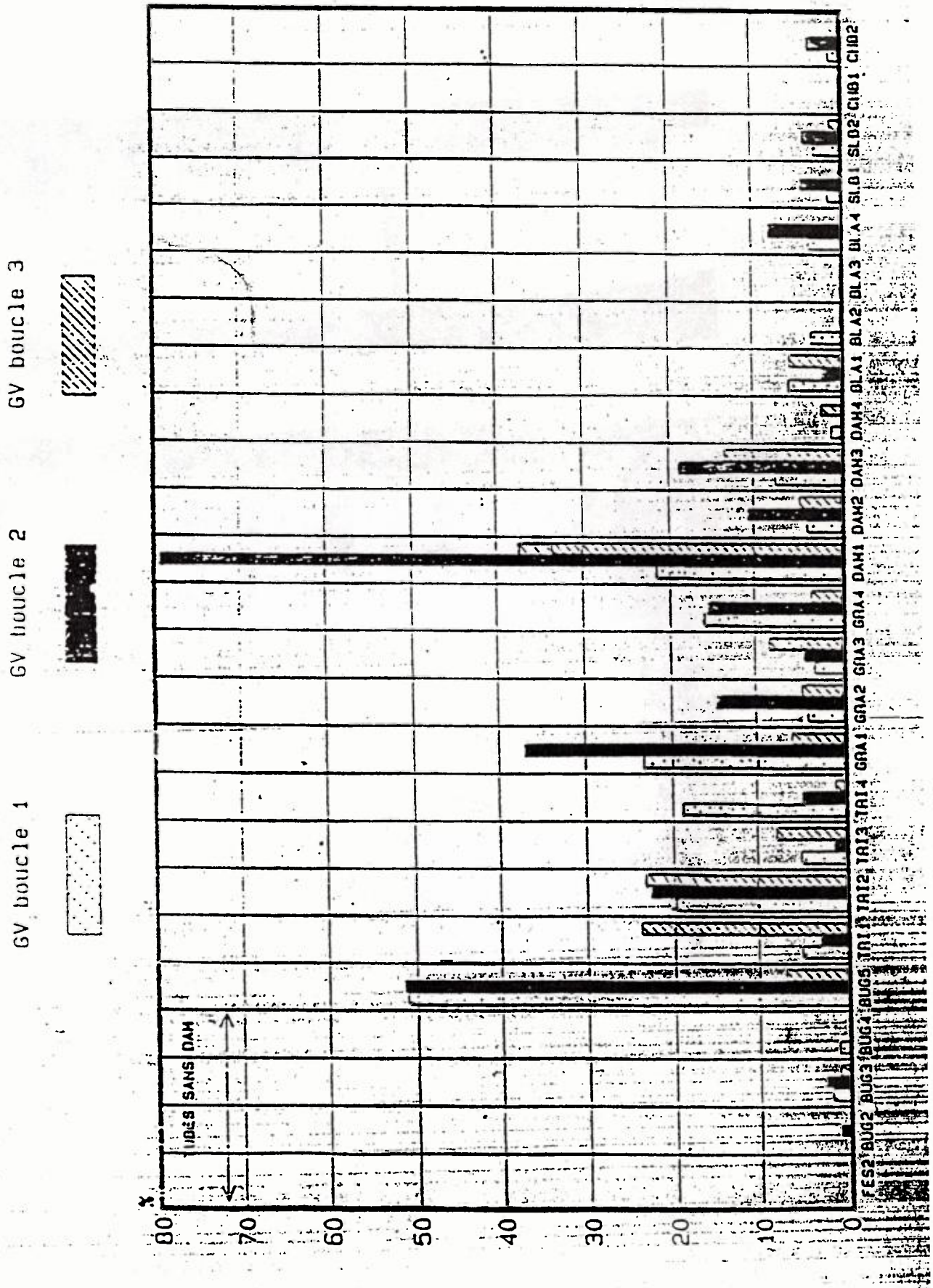


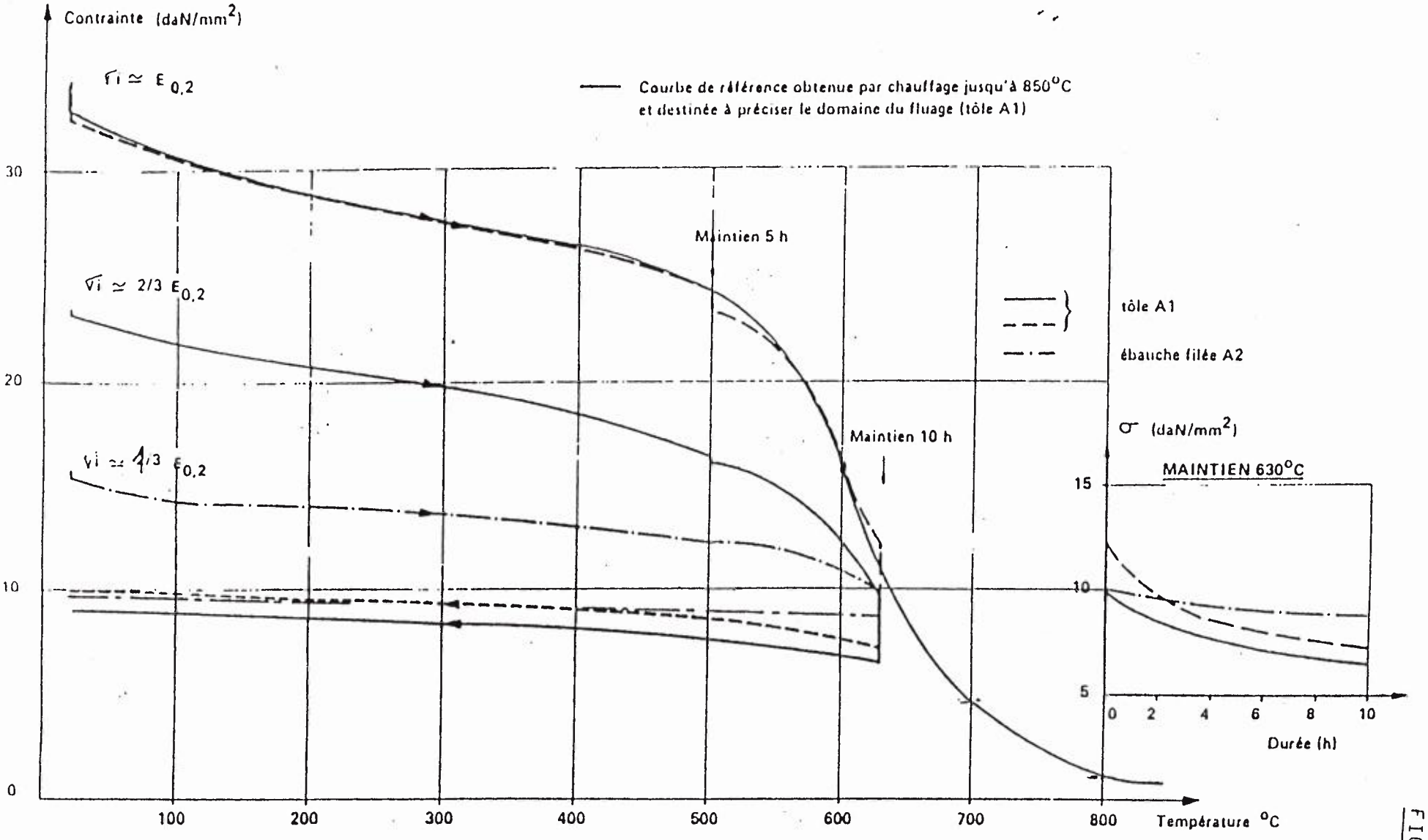
x 100

FIGURE 14

TAUX DE FISSURATION DES TUBES DE G.V.

BILAN FIN 1988



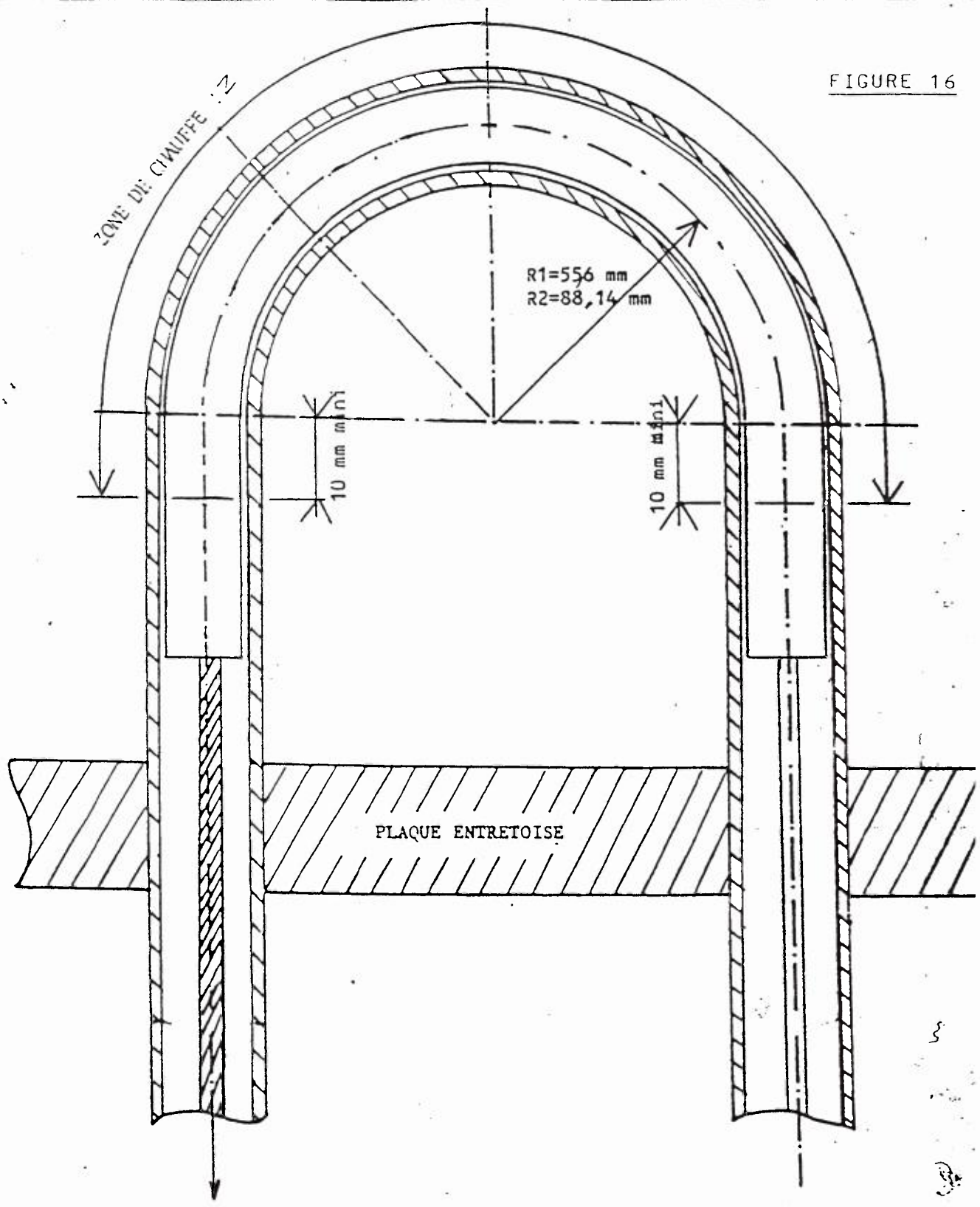


Essais de relaxation anisotherme sur l'INCONEL 600 - Evolution de la contrainte au cours du cycle thermique de référence.

d'après rapport EDF : HC.PV.D 339 MAT/C.10

FIGURE 15

FIGURE 16



ZONE MINIMUM DE TRAITEMENT :
Z = 195 mm pour un cintre de rayon R1 = 55,6 mm
Z = 297 mm pour un cintre de rayon R2 = 88,14 mm

FRAMATOME - 10, rue Juliette Récamier 69006 LYON

FRAMATOME

PRINCIPLE
PRINCIPE

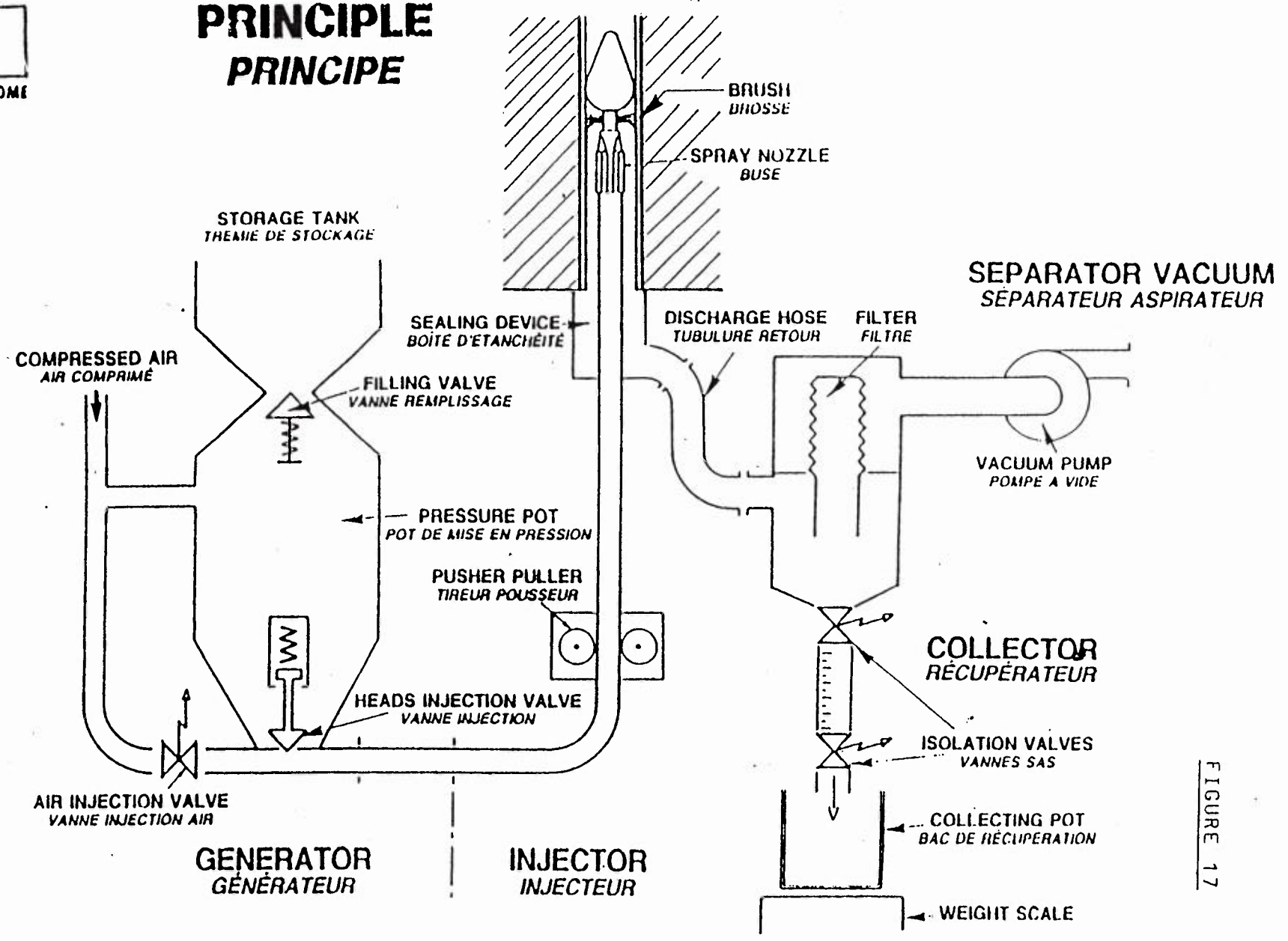
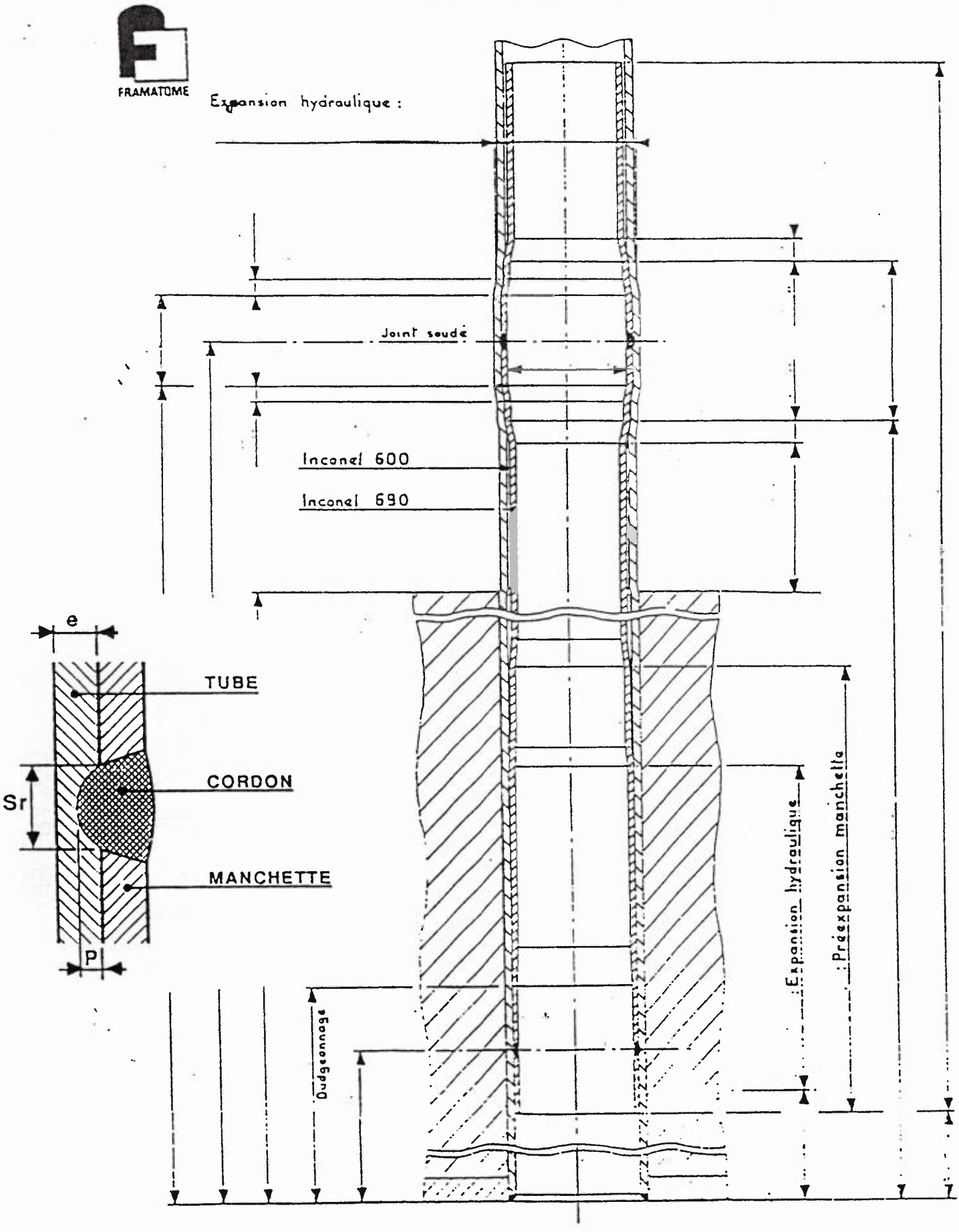


FIGURE 17

FIGURE 18

MANCHETTE INSTALLEE



LES GENERATEURS DE VAPEUR DES CENTRALES REP

SECONDE PARTIE

- I - Les études d'accidents de rupture de tubes de générateur de vapeur (page 1)

- II- L'expérience en matière de rupture de tubes de générateur de vapeur (page 10)

I - LES ETUDES D'ACCIDENTS DE RUPTURE DE TUBES DE GENERATEURS DE VAPEUR

1 - Caractéristiques particulières de l'accident de rupture d'un tube de générateur de vapeur.

La rupture d'un tube de générateur de vapeur est l'une des "conditions de fonctionnement" considérée pour le dimensionnement des tranches.

Toutefois, parmi les accidents de dimensionnement, la rupture d'un tube de générateur de vapeur présente certaines caractéristiques particulières qui méritent d'être soulignées dès l'abord.

Une telle rupture constitue une brèche du circuit primaire et les automatismes prévus pour limiter les conséquences de ces brèches vont donc intervenir. Il en résulte que l'accident de rupture d'un tube de générateur de vapeur n'a pas de caractère dimensionnant pour les systèmes des tranches REP exploitées par Electricité de France.

Mais, dans le cas de cette brèche du circuit primaire, le fluide primaire qui peut être faiblement contaminé, pénètre dans le circuit secondaire au lieu de se déverser dans l'enceinte de confinement. Le circuit secondaire est normalement en communication avec l'atmosphère par l'intermédiaire du système d'extraction des " incondensables"; de plus, si la pression dans ce circuit devient excessive, il peut être mis directement en communication avec l'atmosphère par l'ouverture des vannes de décharge ou des soupapes de sûreté qui assurent sa protection contre les surpressions. Il y a donc "bipasse" de la troisième "barrière de confinement".

.../...

Il faut ajouter que l'accident de rupture de tube de générateur est le seul accident de dimensionnement pour lequel le retour d'expérience a permis de confronter une fréquence observée à une fréquence estimée a priori et de comparer les rejets mesurés aux évaluations conservatives faites dans les études des accidents de dimensionnement. A ce jour, six ruptures significatives, c'est à dire ayant entrainé l'arrêt d'urgence de la tranche et la mise en oeuvre du système d'injection de sécurité, ont été répertoriées dans le monde pour les REP de conception Westinghouse, dont la durée de fonctionnement totale est de l'ordre de 1600 annéesxréacteurs.

Ce retour d'expérience a conduit à modifier en France le classement de l'accident "rupture d'un tube de générateur de vapeur" pour le palier des tranches 1400 MWe (palier N4). Cet accident, initialement classé dans la 4ème catégorie, à laquelle est associée une fréquence estimée de 10^{-6} à 10^{-4} par réacteur et par an, est désormais classé en 3ème catégorie (fréquence estimée de 10^{-4} à 10^{-2}); ce changement implique que les rejets considérés comme acceptables, calculés avec des hypothèses conservatives, soient nettement plus faibles que précédemment. En 4ème catégorie a été introduite une nouvelle "condition de fonctionnement" correspondant à la rupture de deux tubes de générateur de vapeur.

2 - Physique des accidents de rupture de tubes de générateur de vapeur

Les phénomènes mis en jeu sont les mêmes, qu'il s'agisse de la rupture d'un ou de deux tubes.

La rupture d'un tube de générateur de vapeur se traduit par une fuite de fluide primaire vers le circuit secondaire de l'ordre de 50 kg/s. Cette fuite entraine la baisse du niveau dans le pressuriseur et par suite, la baisse de la pression du circuit primaire, provoquant successivement l'arrêt d'urgence du réacteur et le démarrage du système d'injection de sécurité.

.../...

La pression primaire continuant de baisser, le débit d'eau injecté dans le circuit primaire par le système d'injection de sécurité augmente alors que, dans le même temps, la fuite de fluide primaire diminue avec l'écart de pression entre circuit primaire et circuit secondaire. L'équilibre est atteint quand le débit d'eau injecté est égal au débit de la fuite; il est obtenu pour une pression primaire de l'ordre de 100 bars et un débit de fuite de l'ordre de 20 kg/s. La fuite de fluide primaire introduit dans le circuit secondaire des produits de fission relâchés dans le fluide primaire à travers les microfissures des gaines de combustible, notamment de l'iode et du césium. L'arrêt d'urgence provoque une certaine augmentation de l'activité du circuit primaire, qui dépend du nombre et de la dimension des microfissures des gaines. Il provoque aussi le démarrage du système d'alimentation de secours des générateurs de vapeur.

Dans le générateur de vapeur affecté par la rupture qui reçoit, d'une part le débit d'eau amené par le système d'alimentation de secours, d'autre part le débit de la fuite, le niveau monte plus rapidement que dans les autres générateurs de vapeur.

En montant, il comprime la vapeur de la partie supérieure du générateur de vapeur, qui s'échappe alors par les vannes de décharge entraînant le rejet dans l'environnement de produits radioactifs, les gaz rares et une partie de l'iode provenant du circuit primaire (dans le générateur de vapeur, 1% de l'iode est contenu dans la vapeur et 99% dans la phase liquide). Si aucune action n'était entreprise, le niveau d'eau continuerait à monter dans le générateur de vapeur, entraînant le remplissage du générateur de vapeur et le rejet d'eau contaminée directement dans l'atmosphère.

Le rejet d'eau par les soupapes de sûreté entraîne un risque de blocage de celles-ci en position ouverte, ce qui conduirait à des rejets de produits radioactifs plus importants.

.../...

L'équipe de conduite doit donc intervenir pour éviter le remplissage du générateur de vapeur, et mettre en oeuvre une procédure adaptée dès qu'elle a fait le diagnostic de la rupture.

3 - Conduite de la tranche en cas de rupture de tube de générateur de vapeur

Après démarrage (automatique) de l'injection de sécurité, l'opérateur applique une procédure générale qui le guide dans le diagnostic de la situation. Les grandeurs utilisées pour le diagnostic sont l'activité des incondensables extraits du condenseur et l'activité des purges des générateurs de vapeur. Electricité de France a de plus développé une méthode de mesure de l'activité due à l'azote 16 présent dans la vapeur. La mesure est faite par des détecteurs placés sur les tuyauteries de vapeur à leur sortie de l'enceinte de confinement. Cette méthode permet une détection précoce des fuites des tubes de générateur de vapeur et la quantification de l'évolution de ces fuites, en vue d'éviter toute rupture brutale; elle constitue aussi un élément très fiable de diagnostic d'une rupture.

Le diagnostic fait, les opérateurs isolent le générateur de vapeur affecté en fermant les vannes situées sur les tuyauteries de vapeur. Par ailleurs, ils ferment les vannes d'alimentation en eau de ce générateur de vapeur et remettent en service le système de purge pour ralentir la montée du niveau d'eau dans le générateur de vapeur.

Les opérateurs vont ensuite amener le circuit primaire dans des conditions qui permettent d'arrêter l'injection de sécurité. Cette opération, en permettant l'égalisation des pressions du circuit primaire et du circuit secondaire, entraîne l'annulation de la fuite de fluide primaire.

.../...

Ces conditions de pression dans le circuit primaire et de niveau dans le pressuriseur, sont obtenues par le refroidissement du circuit primaire par les générateurs de vapeur sains et par la mise en oeuvre de l'aspersion du pressuriseur.

Il est ensuite possible de continuer à refroidir le réacteur par les générateurs de vapeur puis par le système de refroidissement à l'arrêt et d'atteindre ainsi les conditions permettant l'ouverture du circuit primaire et l'intervention sur le générateur de vapeur affecté.

Si la procédure décrite ci-dessus est mise en oeuvre dans un délai de l'ordre de 10 minutes après l'injection de sécurité, l'accident ne donne lieu qu'au rejet de quelques dizaines de tonnes de vapeur dans l'atmosphère; avec des hypothèses réalistes concernant l'activité initiale du fluide primaire et les facteurs de partage entre les phases eau et vapeur, les rejets d'iode 131 ne dépassent pas quelques millicuries ce qui correspond à des équivalents de doses à la thyroïde très faibles (moins de 10^{-5}Sv à la limite de site en 2 heures). Ces évaluations sont confirmées par le retour d'expérience qui montre que les ruptures de tube de générateur survenues à ce jour ont toutes conduit à des rejets très faibles.

Le calcul fait avec des hypothèses conservatives, en tenant compte notamment d'un délai d'intervention des opérateurs de 20 minutes, donne un rejet de quelques curies d'iode 131 et des équivalents de doses à la thyroïde de quelques 10^{-3}Sv tout à fait acceptables. On aboutit à des conclusions analogues dans l'étude de l'accident de rupture de deux tubes de générateur de vapeur (situation de quatrième catégorie).

.../...

Les évaluations précédentes correspondent au cas où, au moment de la rupture, le réacteur fonctionne à la puissance nominale. En arrêt à chaud, la masse d'eau contenue dans chaque générateur de vapeur est plus importante et en cas de rupture, le générateur affecté va se remplir plus rapidement. Dans ce cas, le calcul fait avec des hypothèses conservatives montre que quelques m^3 d'eau sont relâchés dans l'environnement, conduisant à des équivalents de dose à la thyroïde de quelques 10^{-2} Sv.

4 - Accidents de rupture de tubes de générateur de vapeur cumulée avec d'autres défaillances multiples

On peut s'interroger sur le risque de rupture simultanée d'un grand nombre de tubes de générateur de vapeur. Parmi les accidents de dimensionnement, seule la rupture d'une tuyauterie de vapeur qui entraîne une dépressurisation brutale d'un générateur de vapeur, pourrait constituer une cause commune de défaillance des tubes. Ceux-ci sont en fait conçus pour résister aux sollicitations correspondantes; les programmes de surveillance permettent d'apprécier leur vieillissement et d'intervenir suffisamment tôt pour éviter tout affaiblissement concernant un grand nombre de tubes.

Des évaluations de la probabilité de rupture de plusieurs tubes de générateur de vapeur lors d'une rupture de tuyauterie de vapeur ont été effectuées. Bien que ces évaluations soient entâchées de larges incertitudes, elles permettent d'estimer que la probabilité d'avoir plus de 10 ruptures est très inférieure à 10^{-7} par réacteur et par an.

Néanmoins, les conséquences d'une rupture de tuyauterie de vapeur entraînant la rupture de tubes de générateur de vapeur ont été étudiées avec des hypothèses réalistes.

La présence d'un limiteur de débit à la sortie de chaque générateur de vapeur borne supérieurement le débit de vapeur sortant du générateur de vapeur à une valeur correspondant à la rupture d'une centaine de tubes.

.../...

Les études effectuées ont montré que :

- il n'y a pas de risque de dénoyage durant la dépressurisation du circuit primaire et donc pas de dommage sur le combustible;

- moyennant la mise en oeuvre de la procédure ultime prévue, il est toujours possible de ramener la tranche dans un état sûr avant épuisement de la réserve d'eau nécessaire à l'injection de sécurité dans le coeur. Des dispositions peuvent en outre être prises pour réalimenter cette réserve d'eau.

Les conséquences des accidents étudiés ici sont donc limitées à celles correspondant au rejet de toute l'activité du fluide primaire. Les équivalents de dose associés restent limités.

	n = 1	n = 10	n = 100
Equivalent de dose à la thyroïde (Sv)	$1.5\ 10^{-4}$ 15 mrems	$6\ 10^{-2}$ (6 rems)	$6\ 10^{-2}$ (6 rems)

5 - Mesures visant à limiter les conséquences des ruptures de tubes de générateur de vapeur.

En plus des mesures présentées plus haut, visant à prévenir les ruptures de tubes de générateur de vapeur, des mesures visant à limiter les conséquences de telles ruptures ont été prises, au niveau de l'exploitation pour les tranches des paliers 900 MWe et 1300 MWe, au niveau de la conception pour les tranches en construction du palier 1450 MWe.

.../...

Pour les tranches en exploitation, les procédures de conduite ont fait l'objet d'améliorations portant sur les actions à mener et sur la forme. De plus, pour les tranches dont les générateurs de vapeur apparaissent plus "sensibles", les limites admises d'activité du fluide primaire ont été abaissées de manière à limiter les conséquences d'une rupture de tube, accompagnée de la sollicitation et du blocage en position ouverte d'une soupape de sûreté du circuit secondaire.

Par ailleurs, l'augmentation de la pression de tarage des soupapes des générateurs de vapeur des tranches de 900 MWe et de 1300 MWe est à l'étude.

Pour les tranches du palier 1450 MWe, deux dispositions nouvelles ont été prises pour limiter les conséquences des ruptures de tubes de générateur de vapeur; il s'agit, d'une part de dispositions visant à différer de quelques secondes l'arrêt de la turbine en cas d'arrêt d'urgence (pour éviter l'ouverture des soupapes du circuit secondaire), d'autre part du dédoublement des vannes de décharge à l'atmosphère et de leurs vannes d'isolement, par ailleurs qualifiées pour fonctionner en eau, ce qui permet de garantir l'absence de fonctionnement en eau des soupapes du circuit secondaire.

6 - Formation des opérateurs

Compte tenu de l'importance de la réaction rapide des opérateurs pour limiter les rejets de produits radioactifs, Electricité de France a entrepris une action de sensibilisation de ses opérateurs à ce sujet et développé des moyens spécifiques de formation pour cet accident.

.../...

Comme toutes les situations accidentelles pour lesquelles une procédure de conduite a été définie, la rupture de tube de générateur est systématiquement traitée lors des modules de formation de base sur simulateur ainsi que lors des modules de recyclage auquels les opérateurs sont soumis. De plus, depuis 1984, des modules de "mise en situation" amènent une équipe constituée à faire face à une situation accidentelle sans préparation préalable en salle.

Dans les centrales, dans le cadre de leur mission de formation, les ingénieurs de sûreté et de radioprotection, qui sont par ailleurs appelés en salle de conduite en cas d'accident, assurent une présentation pédagogique des incidents d'exploitation et sensibilisent les opérateurs aux évolutions des spécifications techniques et aux modifications mises en place sur les tranches.

Electricité de France a, par ailleurs, entrepris le développement d'un outil pédagogique particulier, permettant de simuler les accidents de rupture de tube de générateur de vapeur dans tous les états de la tranche en prenant en compte diverses indisponibilités de matériel. L'outil analyse a posteriori la conduite de l'opérateur, et lui explique ses erreurs, en lui rappelant les bases physiques fondamentales.

La validation de cet.outil pédagogique au centre de formation du Bugey et sur la centrale de Tricastin vient de s'achever; l'outil sera installé dans le courant de 1989 sur chacun des sites de 900 MWe et de 1300 MWe.

.../...

II - L'EXPERIENCE EN MATIERE DE RUPTURE DE TUBE DE GENERATEUR DE VAPEUR

1 - Généralités

Les mécanismes de dégradation des tubes (usure mécanique, fissuration d'origine mécanique ou thermique, corrosion) sont en général de nature progressive et la rupture d'un tube de générateur de vapeur sera généralement précédée d'une dégradation partielle conduisant à une fuite (cf. en 4.1 le développement du critère de fuite avant risque de rupture). La détection des fuites du circuit primaire vers le circuit secondaire constitue d'ailleurs un des moyens permettant de prévenir une rupture, la détection d'une fuite significative conduisant à l'arrêt de l'installation pour élimination du (ou des) tube(s) à l'origine de la fuite.

La vitesse d'évolution des phénomènes entre l'apparition d'une fuite et la rupture du tube est variable suivant le type de dégradation ; elle peut être très rapide et conduire à une rupture du tube en quelques minutes, équivalente à une rupture instantanée puisque, dans ce cas, le délai disponible n'est pas suffisant pour arrêter l'installation. Il est donc particulièrement important de connaître les types de dégradations qui peuvent conduire à une rupture de ce type et plus généralement à des ruptures de tubes en conditions accidentelles, de façon à procéder à l'élimination préventive des tubes correspondants. Les contrôles réalisés lors des arrêts annuels permettent l'obturation (ou le manchonnage) des tubes sur lesquels on détecte des configurations dangereuses.

Les mécanismes de dégradation étant des phénomènes complexes, la connaissance des types de dégradations dangereuses et des vitesses d'évolution des dégradations connues n'est toutefois pas exhaustive.

Les incidents de NORTH ANNA 1 et d'ALMARAZ 1 décrits ci- après, illustrent ces deux cas :

. dans le premier incident, la rupture du tube était due à un type de dégradation qui n'avait pas été jusqu'à maintenant rencontré;

. dans le deuxième incident, la dégradation constatée sur le tube à l'origine de la fuite correspondait à un phénomène connu (corrosion externe) mais dont la vitesse d'évolution avait été augmentée par des conditions chimiques particulières du circuit d'eau secondaire.

Il est donc important de disposer de moyens aussi fiables et aussi sensibles que possible pour détecter au plus vite les fuites de fluide primaire, même faibles.

2 - Expérience étrangère

Sept ruptures sont actuellement survenues dans le monde dans des générateurs de vapeur de réacteurs à eau pressurisée ; elles sont répertoriées dans le tableau 1. Une seule a eu lieu en France, sur la CAP (réacteur prototype du CEA) dont la conception est différente de celle des réacteurs électronucléaires.

Trois ruptures étrangères sont décrites ci-après à titre d'exemple ainsi qu'un incident qui a conduit à une fuite sans rupture, mais pour lequel le risque de rupture existait.

1/ Incident survenu à la centrale de DOEL 2, le 25.06.1979

L'incident s'est produit alors que le réacteur était en cours de redémarrage après un arrêt pour intervention sur le circuit secondaire ; la pression primaire était à sa valeur nominale, la température primaire avait presque atteint sa valeur nominale, le réacteur n'était pas encore divergé.

.../...

Dans un premier temps, la fuite, détectée par une baisse de la pression primaire de 2 bars par minute, a été considérée comme résultant d'une brèche du circuit primaire. Les actions automatiques et manuelles correspondantes ont alors été effectuées. Ce n'est que 10 minutes plus tard qu'il y a eu alarme sur l'activité des purges des générateurs de vapeur, puis constatation d'une augmentation anormale de niveau d'eau du circuit secondaire de l'un des générateurs de vapeur, ce qui a permis à l'exploitant d'orienter correctement la conduite.

Le débit de fuite était un peu supérieur à 30 m^3/h, si bien qu'il était presque compensé par le circuit de charge normal. L'injection de sécurité n'est intervenue que lorsque le générateur de vapeur a été isolé du côté secondaire et que l'exploitant a commencé à refroidir le circuit primaire à l'aide du générateur de vapeur sain.

Quelques difficultés d'application des procédures de conduite ont conduit à n'obtenir l'équilibrage des pressions du circuit primaire et du circuit secondaire du générateur de vapeur affecté qu'au bout de trois heures. Ceci a conduit à un remplissage important du générateur de vapeur en eau sans toutefois provoquer l'ouverture des soupapes de protection. Cet incident n'a pas donné lieu à des rejets de produits radioactifs à l'extérieur de l'installation. La fuite était due à une fissure longitudinale dont la longueur a été estimée à 70 mm, située dans un cintre de faible rayon ; la fissuration était due à la corrosion sous tension favorisée par des contraintes résiduelles de fabrication dues à une ovalisation excessive du tube.

Cet incident montre que la rupture peut se produire alors que le réacteur n'est pas en puissance, ce qui rend plus difficile l'identification de l'accident.

2/ Incident survenu à la centrale de GINNA 1, le 25.01.1982

La tranche était à sa puissance nominale lorsqu'il y a eu apparition simultanée des alarmes suivantes, permettant clairement d'identifier une rupture de tube de générateur de vapeur :

- activité élevée des gaz extraits du condenseur,
- baisse rapide de la pression primaire,
- augmentation anormale du niveau d'eau du circuit secondaire de l'un des générateurs de vapeur.

Les actions automatiques (arrêt d'urgence et injection de sécurité) sont intervenues 3 minutes plus tard ; la ligne de vapeur du générateur de vapeur affecté a été fermée 15 minutes plus tard et l'ensemble du générateur de vapeur a été isolé 25 minutes plus tard.

La fuite de fluide primaire n'a été annulée que 3 heures plus tard, ce qui a conduit au remplissage complet en eau du générateur de vapeur affecté, à plusieurs ouvertures d'une soupape de protection qui ne s'est pas totalement refermée, d'où une petite fuite permanente pendant près d'une heure.

Les rejets ont été essentiellement constitués de gaz rares et de tritium. Il y a eu également rejet d'une faible quantité d'iode et de produits tels que cobalt et césium du fait de la fuite en eau de la soupape.

Cet incident, qui est celui dont les conséquences radiologiques ont été les plus importantes, n'a eu que des conséquences très limitées ; le débit de dose maximal de 30 µSv/h relevé à la limite du site a rapidement diminué pour revenir au niveau du bruit de fond au bout de 12 heures. Le plan d'urgence avait été déclenché environ une heure après le début de l'incident.

.../...

Le débit de fuite au début de l'incident, a été estimé compris entre 150 et 170 m³/h ; la rupture ne semble pas avoir été précédée d'une fuite. Le tube à l'origine de la fuite possédait une fissure longitudinale importante dans la zone située au-dessus de la plaque tubulaire. Il a éclaté suite à l'usure provoquée par le mouvement d'un tube voisin, lui-même totalement rompu. Ce dernier tube qui avait été obturé précédemment, du fait d'une usure par un corps étranger, a continué d'être usé jusqu'à la rupture, par le corps étranger qui n'avait pas été retiré.

Cet incident montre l'intérêt d'optimiser la conduite de façon à annuler au plus vite la fuite et éviter le remplissage du générateur de vapeur ainsi que la sollicitation en eau des organes de décharge.

3/ Incident survenu à la centrale de NORTH ANNA 1, le 15.07.1987

L'incident s'est produit alors que la tranche était en cours de redémarrage après un arrêt annuel pour entretien et rechargement du combustible ; elle avait atteint sa puissance nominale le 14.07.1987, soit 24 heures avant l'accident.

Les opérateurs ont été alertés par l'augmentation rapide de l'activité des lignes de vapeur, suivie immédiatement d'une baisse du niveau d'eau dans le pressuriseur et d'une baisse de la pression primaire, ce qui les a conduits à déclencher manuellement l'arrêt du réacteur, qui a été suivi de l'injection de sécurité démarrée automatiquement.

Le générateur de vapeur défaillant a été isolé au bout de 18 minutes et la fuite de fluide primaire a été annulée au bout de 35 minutes.

Les rejets de produits radioactifs par l'extraction des gaz du condenseur et l'échappement de la turbopompe d'eau alimentaire de secours (système de sauvegarde) ont été extrêmement limités (gaz rares). Les conséquences radiologiques ont été insignifiantes : le

.../...

débit maximal d'équivalent de dose de 4 nSv/h, relevé à la limite du site est environ 10 000 fois plus faible que celui relevé lors de l'incident de GINNA 1.

Les faibles conséquences s'expliquent, malgré l'importance de la fuite (de l'ordre de 150 m^3/h), par les faits suivants :

- l'activité du fluide primaire était très faible au moment du redémarrage,
- la durée des rejets a été très courte car l'incident a été rapidement maîtrisé par les opérateurs : il n'y a eu ni défaillance de matériel ni erreur humaine.

Le tube à l'origine de la fuite avait une fissure circonférencielle au-dessus de la dernière plaque entretoise côté branche froide. La rupture du tube a été causée par une fatigue vibratoire, associée à un blocage du tube dans la plaque par des dépôts dans l'interstice tube-plaque.

Une analyse a posteriori laisse penser qu'il y a eu apparition d'une fuite dans l'heure ou les heures qui ont précédé la rupture. Les raisons pour lesquelles la détection n'a pas eu lieu plus tôt n'apparaissent pas clairement. En effet :

- la mesure d'activité des gaz extraits du condenseur était indisponible,
- la mesure d'activité des purges des générateurs de vapeur n'a pas donné d'alarme,
- les mesures d'activité de la vapeur n'ont donné une alarme qu'au moment de la rupture.

Cet incident montre que, si les actions de conduite sont bien menées, les conséquences radiologiques sont extrêmement faibles. Il souligne par ailleurs la nécessité de disposer de moyens de détection des fuites redondants et performants, pour permettre la mise à l'arrêt au plus vite de l'installation.

.../...

4/ Incident survenu à la centrale d'ALMARAZ 1, le 13.07.1988

Il s'agit d'un réacteur à eau pressurisée de conception Westinghouse de 900 MWe à trois boucles, mis en service en 1981.

La tranche était en puissance lorsqu'une montée d'activité importante des gaz extraits du condenseur et des purges des générateurs de vapeur a été constatée. Des analyses chimiques complémentaires ont conduit l'exploitant à estimer le débit de fuite à 200 l/h. La tranche a été mise à l'arrêt 2 heures après la première alarme et le plan d'urgence a été déclenché.

Le tube à l'origine de la fuite avait une fissure longitudinale de 30 mm située au-dessus de la première plaque entretoise côté branche chaude. Ce tube avait été contrôlé lors de l'arrêt annuel précédent, 5 mois plus tôt, et trouvé sans défaut. L'évolution rapide de la fissuration de ce tube semble liée à un dépôt important de boues secondaires sur la première plaque entretoise, par suite de problèmes de chimie d'eau secondaire.

Le tube a été extrait et soumis à des essais en laboratoire ; la pression d'éclatement constatée a été de 136 bars, ce qui correspond à une marge très faible par rapport à la différence de pression maximale en service (110 bars). Le tube aurait éclaté s'il y avait eu rupture d'une tuyauterie de vapeur, occasionnant une différence de pression de 170 bars.

Cet incident souligne l'intérêt de détecter au plus tôt les fuites de façon à mettre à l'arrêt l'installation avant que l'évolution du défaut ne conduise à la rupture du tube.

3 - Expérience française

La seule rupture survenue en France a eu lieu en juin 1979 sur la CAP (prototype de réacteur de propulsion navale).
Cet incident n'a pas donné lieu à un relâchement d'activité à l'extérieur de l'installation, mais il y a eu par contre pollution des circuits et des locaux secondaires, du fait que les opérateurs n'ont pas strictement appliqué les documents de conduite.

La fuite, qui avait été détectée par une augmentation de l'activité des gaz extraits du condenseur, était due à la rupture d'un tube dans sa partie haute. L'origine de cette rupture n'a pas été clairement établie ; elle pourrait être due à la combinaison de phénomènes thermiques, de corrosion ou de frottement avec les tubes voisins.

La conception du réacteur, celle du générateur de vapeur en particulier, est très différente de celle des réacteurs à eau pressurisée exploités par EdF.

Pour ce qui concerne ces réacteurs, de nombreuses fuites sont apparues sur les générateurs de vapeur depuis leur mise en service. Dans pratiquement tous les cas, les tranches concernées ont été mises à l'arrêt avant que la valeur de la fuite de fluide primaire n'atteigne la limite de 70 l/h fixée par les spécifications techniques (cette valeur est actuellement abaissée à 5 l/h pour les générateurs de vapeur les plus affectés). Aucun cas de fuite en service dépassant notablement 70 l/h n'a été rencontré.

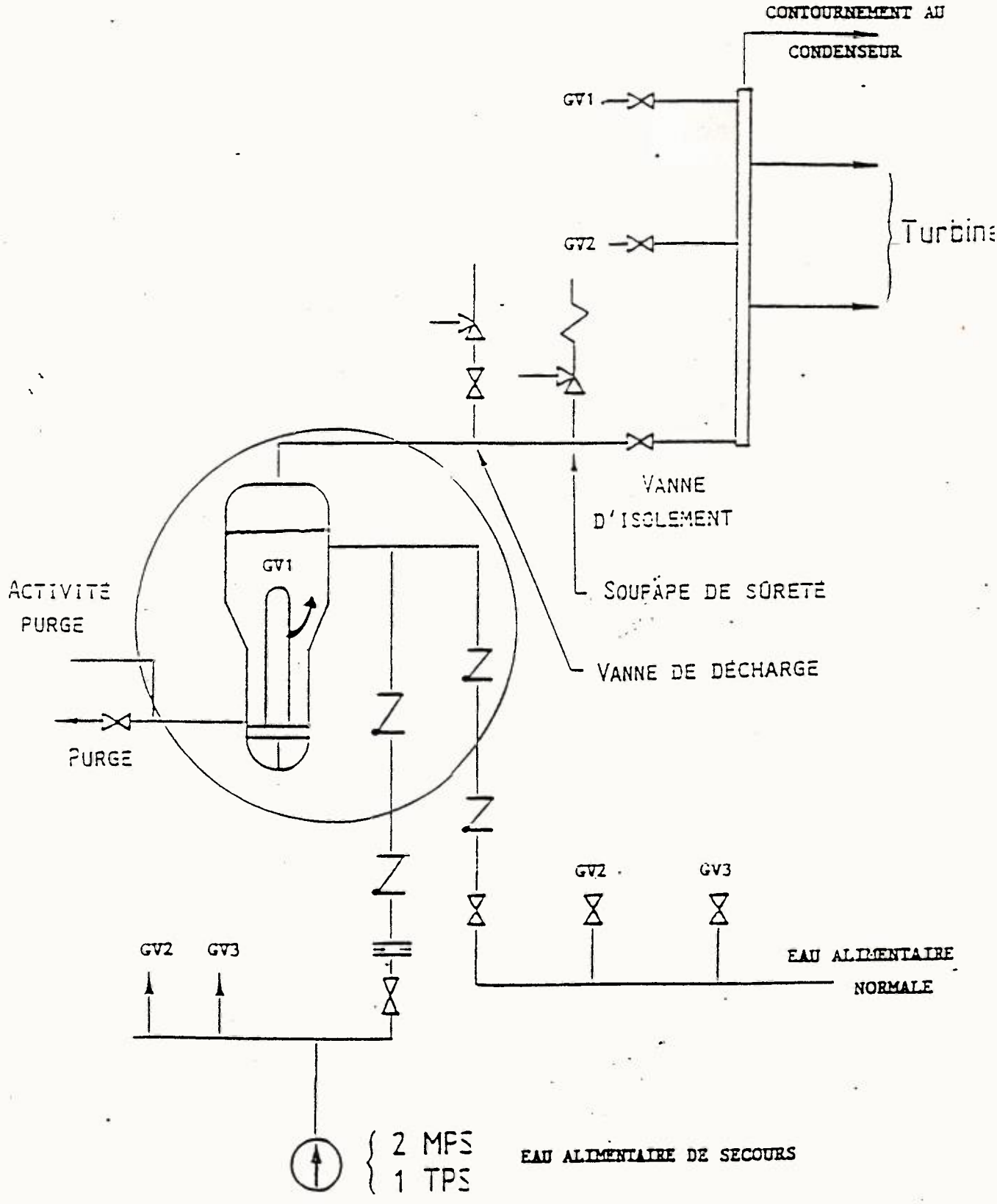
Pour les tranches actuellement en fonctionnement, un grand nombre de générateurs de vapeur ont une fuite comprise entre 1 et 5 l/h. Ces fuites, suivies en permanence, sont essentiellement dues à des fissures très courtes (quelques millimètres) en zone de transition de dudgeonnage ; en cas d'évolution significative de la fuite, l'installation est mise à l'arrêt pour éliminer le (ou les) tube(s) responsable(s) de la fuite.

.../...

T A B L E A U

Rupture de tube de générateur de vapeur

DATE	REACTEUR	NATURE RUPTURE	DEBIT INITIAL
26.02.75	POINT BEACH 1- USA W - MSI fin 70 2 boucles 500 MWe	Au-dessus de la plaque tubulaire Combinaison d'amincissement et de corrosion sous contrainte.	5,6 kg/s
15.09.76	SURRY 2 - USA W - MSI 05.73 3 boucles 800 MWe	Fissure axiale au sommet d'un tube central. Corrosion sous contrainte	3,5 kg/s
04.06.79	CAP-France CEA - MSI 1975 Intégré 120 MWth	Fissure à la partie supérieure d'un tube.	
02.10.79	PRAIRIE ISLAND 1 USA W - MSI 12.73 2 boucles 600 MWe	Au-dessus de la plaque tubulaire. Corps étranger	17 kg/s
25.06.79	DOEL 2 - Belgique W - MSI 1970 2 boucles 400 MWe	Fissure axiale dans un cintre de faible rayon. Corrosion sous contrainte	11 kg/s
25.01.82	GINNA 1 - USA W - MSI 1970 2 boucles 480 MWe	Au-dessus de la plaque à tube. Corps étranger	48 kg/s
15.07.87	NORTH ANNA 1 - USA W - MSI 1978 3 boucles 900 MWe	Au-dessus de la dernière plaque entretoise côté froid. Fatigue vibratoire associée à du denting	35 kg/s


CONTOURNEMENT AU
CONDENSEUR
GV1
GV2
Turbine
VANNE
D'ISOLEMENT
SOUPAPE DE SÛRETÉ
VANNE DE DÉCHARGE
GV1
ACTIVITÉ
PURGE
PURGE
GV2
GV3
GV2
GV3
EAU ALIMENTAIRE
NORMALE
2 MPS
1 TPS
EAU ALIMENTAIRE DE SECOURS