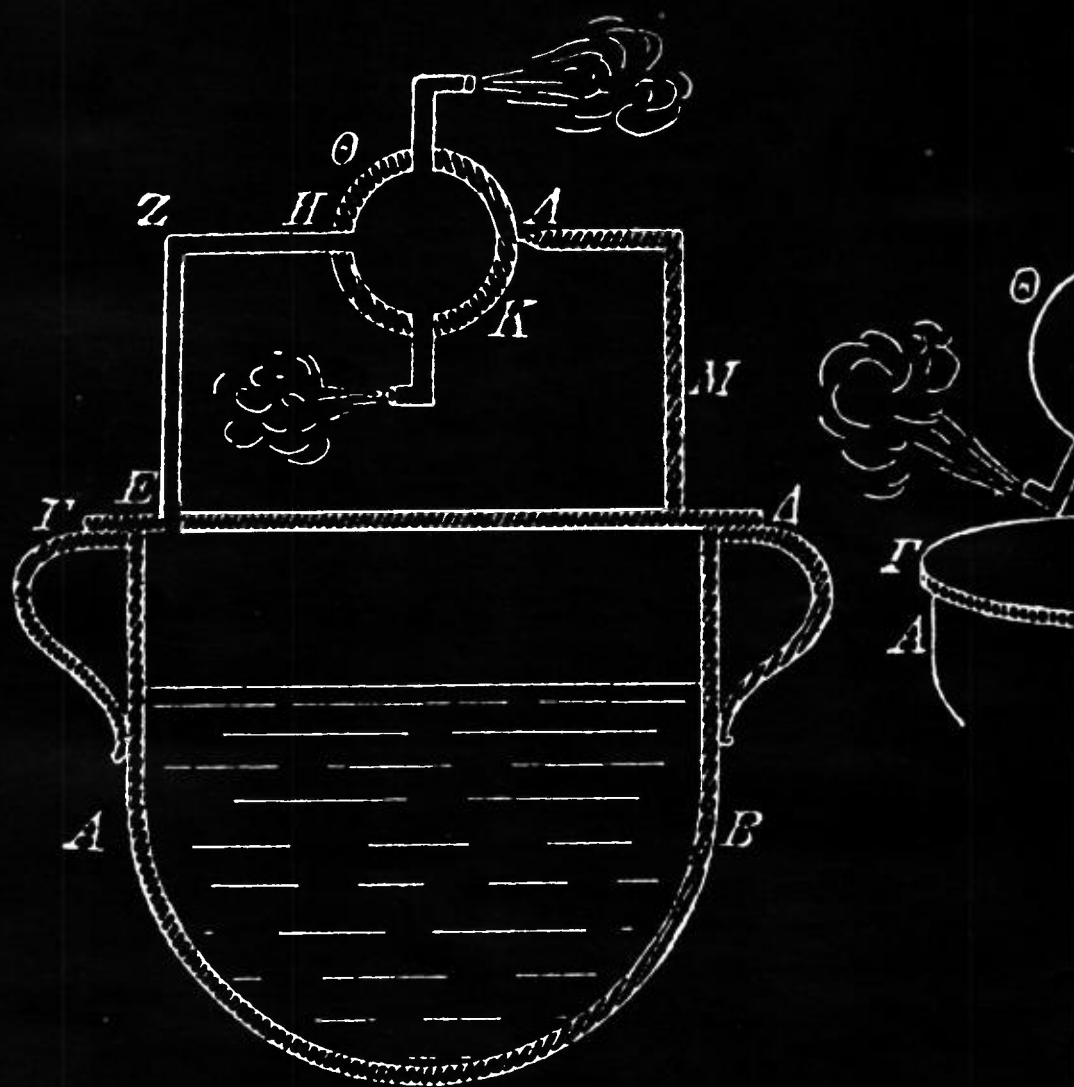


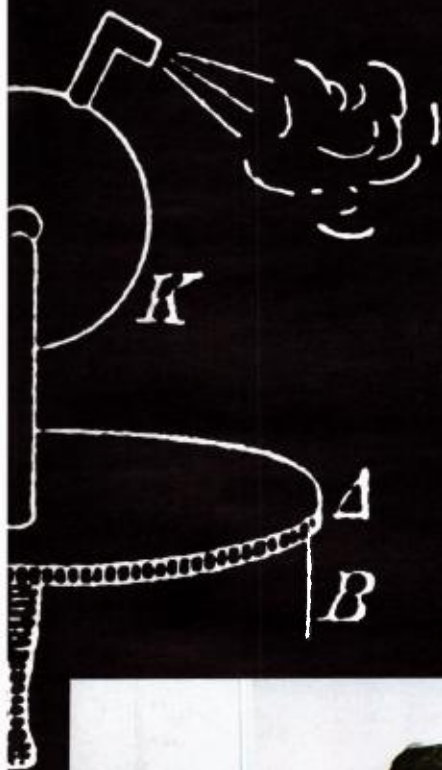
μετρον συντετροημένα αὐτῇ καὶ ἐπικεκαμμένα
 μται ἔστωσαν πρὸς ὀρθὰς ἐπινοούμεναι διὰ τῶ



θήσεται οὖν θερμαινόμενου τοῦ λέβητος τὴν ἀπὸ
 τὴν σφαῖραν ἐμπιπτόυσαν ἐκπίπτειν διὰ τῶν ἀ

la corrosion des tubes de générateurs de vapeur dans les réacteurs nucléaires à eau pressurisée

Jean-Roger Donati
Pierre Saint-Paul – Guy Zacharie



La possibilité de produire de l'énergie mécanique à partir de la vapeur est connue de longue date. Mais depuis que Héron d'Alexandrie décrit au 1^{er} siècle de notre ère la première machine tournante fonctionnant suivant ce principe, l'augmentation des températures, des pressions et de la taille des appareils a rendu la technologie des générateurs de vapeur de plus en plus complexe.

Dans les centrales thermiques conventionnelles au charbon, au fuel ou au gaz, il a été possible de résoudre ces problèmes sans recourir, pour les tubes évaporateurs, à des matériaux sophistiqués. L'acier au carbone a pu être utilisé, grâce, il est vrai, à des précautions particulières sur la chimie de l'eau.

Dans les centrales nucléaires à eau pressurisée, ce choix simple n'a pu être reconduit, du fait de l'apparition d'exigences nouvelles. Les tubes sont en effet, dans ces centrales, chauffés par un circuit d'eau en contact avec le cœur nucléaire, et devant satisfaire de ce fait à des exigences chimiques particulières. D'autre part, en milieu radioactif, les conséquences de fuites ainsi que la difficulté d'intervention conduisent à rechercher une fiabilité accrue.

Ce sont donc des aciers et alliages inoxydables qui ont été utilisés, mais cette « inoxydabilité » ne les met pas à l'abri de nombreux problèmes de corrosion, dont la connaissance a considérablement progressé au cours des dernières années.



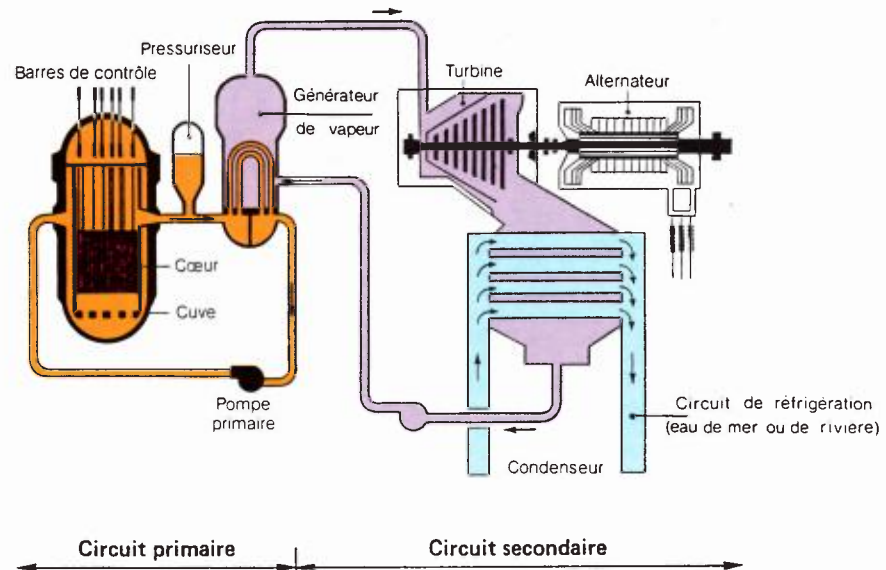
Jean-Roger Donati (à droite), Ingénieur des Arts et Manufactures, Docteur ès Sciences, entré à la D.E.R. en 1963, dirige le Département Étude des Matériaux depuis 1980.

Pierre Saint-Paul (à gauche), Docteur 3^e cycle, entré à la D.E.R. en 1967, dirige depuis 1973 la Division Chimie et Corrosion de ce Département et est actuellement Chef de Département Adjoint.

Guy Zacharie (au centre), Ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aéronautique de Poitiers, entré à la D.E.R. en 1968, dirige depuis 1978 la Division Essais Physiques.

Les réacteurs nucléaires à eau pressurisée comportent, sur leur circuit primaire, un ou plusieurs générateurs de vapeur vaporisant l'eau d'un circuit

secondaire, le fluide primaire circulant à l'intérieur de tubes groupés en faisceau (figure 1). Ces tubes sont en général cintrés à différents rayons de courbure ;



L'eau du circuit primaire, en jaune sur le schéma, est chauffée par le cœur du réacteur et circule à l'intérieur des tubes du générateur de vapeur. L'eau du circuit secondaire, en mauve, se vaporise dans le générateur de vapeur. La vapeur produite entraîne la turbine, se condense dans le condenseur et retourne au générateur de vapeur.

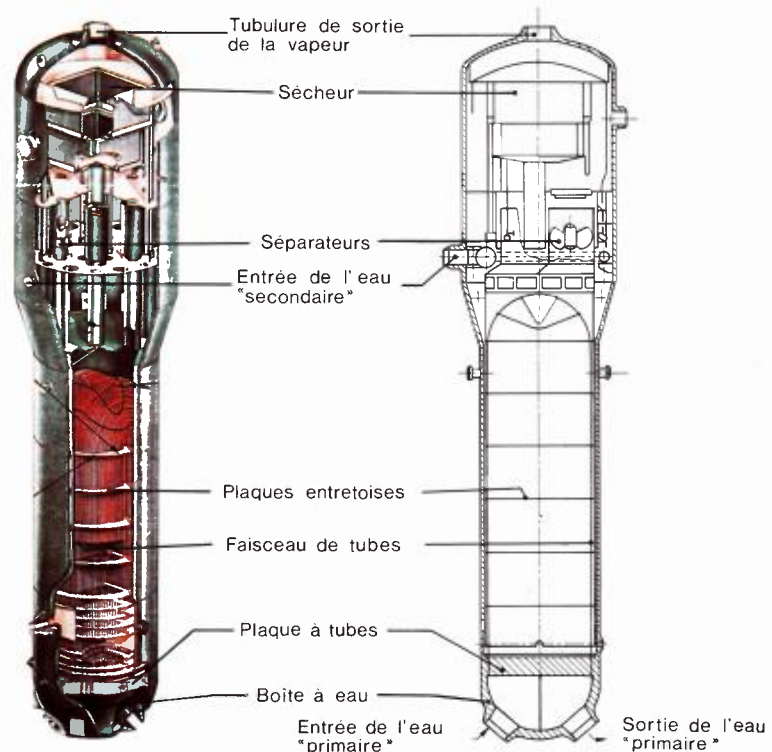


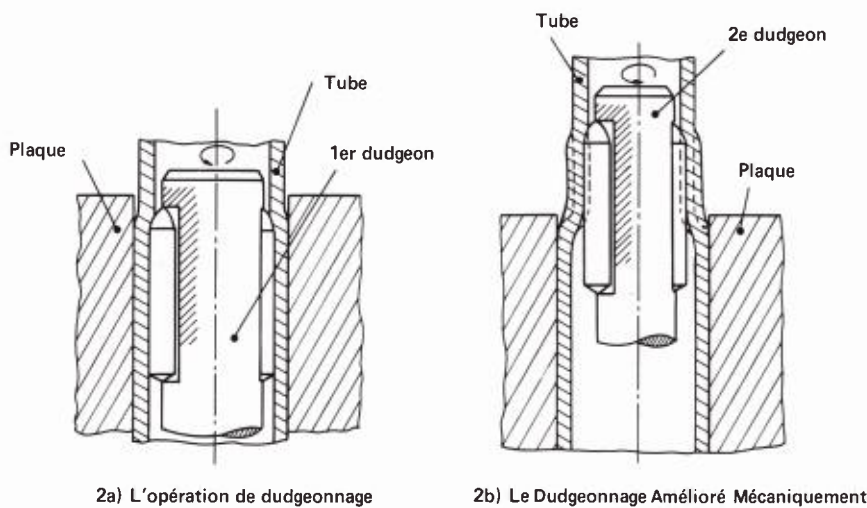
figure 1. — Schéma de principe général d'une centrale à eau pressurisée et vue de détail d'un générateur de vapeur type Westinghouse.

leurs extrémités sont raccordées au circuit primaire par une plaque à tubes et une boîte à eau (figure 2). Les différentes caractéristiques de ces appareils ont nettement évolué depuis la mise en service des premiers réacteurs de production d'électricité : le tableau I montre, à titre d'exemple, la comparaison des deux réacteurs franco-belges : Chooz, 300 MW, mis en service en 1967 et Tihange, 900 MW, mis en service en 1975. Les générateurs de vapeur des réacteurs de type Westinghouse construits jusqu'ici en France sont très semblables à ceux de Tihange ; chacun renferme environ 3 300 tubes de 20 m de long, soit au total plus de 60 km de tubes. Il existe également des appareils d'un type différent, comportant des tubes droits, tels que ceux construits par Babcock et Wilcox aux Etats-Unis.

tableau I — Caractéristiques comparées des générateurs de vapeur des centrales de Chooz et de Tihange.

	Chooz	Tihange
Chaleur échangée (MW d'énergie thermique par générateur de vapeur)	226	886
Surface d'échange (m²)	1390	4800
Nombre de tubes	1666	3388
Diamètre extérieur des tubes (mm)	19,1	22,2
Épaisseur nominale des tubes (mm)	1,65	1,27
Eau primaire		
Débit (t/h)	4700	15230
Température d'entrée (°C)	300	321
Température de sortie (°C)	267	284
Vapeur		
Débit (t/h)	393	1730
Pression absolue à pleine charge (bar)	35	54
Dimensions générales		
Longueur hors tout (m)	13,8	21,2
Diamètre extérieur maximal (m)	3,2	4,5
Poids à vide (t)	113	320
Épaisseur de la plaque à tubes (mm)	425	550

figure 2 — Assemblage des tubes de générateurs de vapeur dans la plaque à tubes : l'opération de dudgeonnage.



L'opération de dudgeonnage consiste à fixer le tube dans la plaque à tubes en l'élargissant à l'aide d'un outil à galets tournants (dudgeon) de façon à venir appuyer sa paroi contre celle de l'orifice percé dans la plaque (figure 2 a).

Cette opération introduit dans la zone de transition entre la partie déformée et la partie non déformée du tube des contraintes de tension très élevées en surface externe et interne.

Depuis 1978, une opération complémentaire au dudgeonnage consistant à produire à l'aide d'un dudgeon une petite déformation diamétrale de la zone de transition du tube est appliquée industriellement (figure 2 b). Ce procédé, mis au point au département Étude des Matériaux de la Direction des Études et Recherches, est connu sous le nom de Dudgeonnage Amélioré Mécaniquement (DAM). Il permet d'abaisser notablement les contraintes de tension sur la surface externe du tube. Sur la surface interne, l'opération ne diminue pas sensiblement les contraintes de tension, mais modifie profondément leur distribution : les contraintes circonférentielles, qui produiraient une fissuration longitudinale, subsistent alors que les contraintes longitudinales, qui pourraient être à l'origine de fissures circonférentielles, sont abaissées. Cet effet est intéressant du point de vue de la sûreté dans la mesure où il apporte une garantie complémentaire contre la rupture franche des tubes.

le matériau des tubes

Ce sont tout d'abord des aciers inoxydables à 18% de chrome et 10% de nickel qui ont été utilisés pour les tubes. Les générateurs de vapeur de la centrale de Chooz sont équipés de tels faisceaux, dont le comportement a été tout à fait satisfaisant pendant près de 100 000 heures de fonctionnement. Toutefois, ces aciers inoxydables sont connus pour être très sensibles à la fissuration par corrosion dans des milieux contenant des chlorures et de l'oxygène. Différentes avaries en service survenues aux Etats-Unis — rupture de tubes d'échangeurs auxiliaires du sous-marin Nautilus et de tubes de générateurs de vapeur de plusieurs réacteurs — ont conduit à rechercher des matériaux plus résistants à cette forme de corrosion.

C'est ainsi qu'a été introduit l'alliage de nickel type « 600 » (tableau II) utilisé depuis 1967 pour de très nombreux générateurs de vapeur, notamment ceux de type Westinghouse, Combustion Engineering et Babcock et Wilcox. Les seuls générateurs de vapeur récents possédant des tubes en acier inoxydable équipent les réacteurs soviétiques et certains réacteurs navals. Les alliages à teneur intermédiaire en nickel, de type « 800 », ont également été considérés pour cette application et sont utilisés en Allemagne dans les unités construites par la Société Kraft Werk Union.

Différentes difficultés rencontrées en service avec ces alliages — sur lesquelles nous allons revenir dans la suite de cet article — ont conduit à soumettre également aux essais d'autres types de matériaux : acier inoxydable biphasé et alliage de nickel type « 690 ».

tableau II — Les principaux matériaux considérés pour les tubes de générateurs de vapeur des réacteurs à eau pressurisée (Composition en % en poids).

	Chrome	Nickel	Fer	Autres éléments
Acier inoxydable « austénitique » *	18	10	68	Parfois avec addition de molybdène, titane ou niobium
Alliage « 600 »	16	74	8	—
Alliage « 800 »	21	33	43	—
Alliage « 690 »	29	60	9	—
Acier inoxydable biphasé **	21	7	69	Molybdène 2 %

* Cet acier est constitué d'une seule phase appelée austénite.

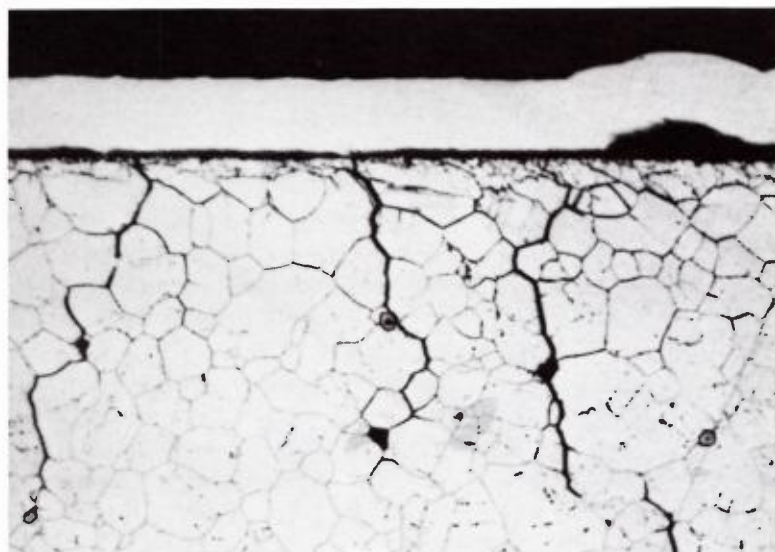
** L'acier inoxydable biphasé contient, outre l'austénite, une deuxième phase appelée ferrite à teneur voisine de 45 %.

les principaux types de corrosion rencontrés en service

Le nombre de fuites du circuit primaire vers le circuit secondaire dues à des percements de tubes de générateurs de vapeur, faible avant 1970, est devenu important à partir de 1972. Ces incidents ont nécessité des contrôles réguliers et l'obturation des tubes présentant un endommagement jugé inadmissible. C'est ainsi que plusieurs milliers de tubes ont dû être mis hors service dans les centrales exploitées aux Etats-Unis et dans de nombreux autres pays ; les générateurs de vapeur les plus atteints ont même été remplacés.

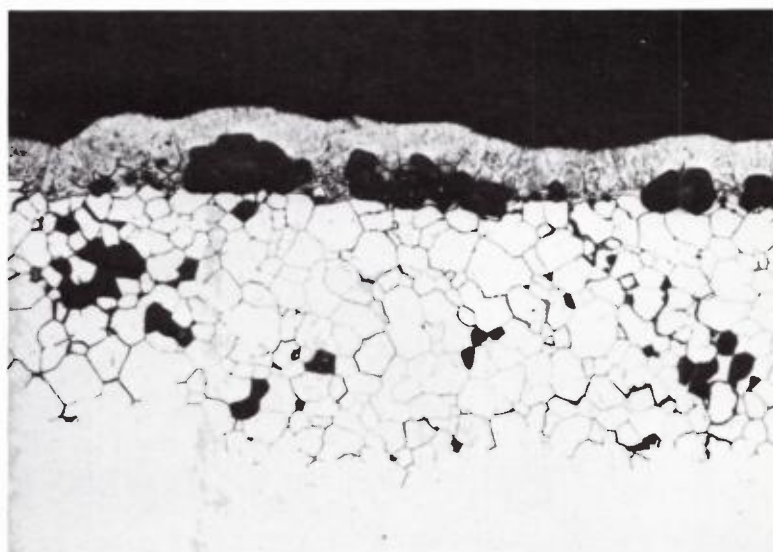
Les causes des avaries de tubes sont principalement des corrosions d'origines diverses (figure 3) :

Des fissurations par corrosion sous contrainte à partir de l'extérieur des tubes en alliage « 600 » (figure 3a) ont été



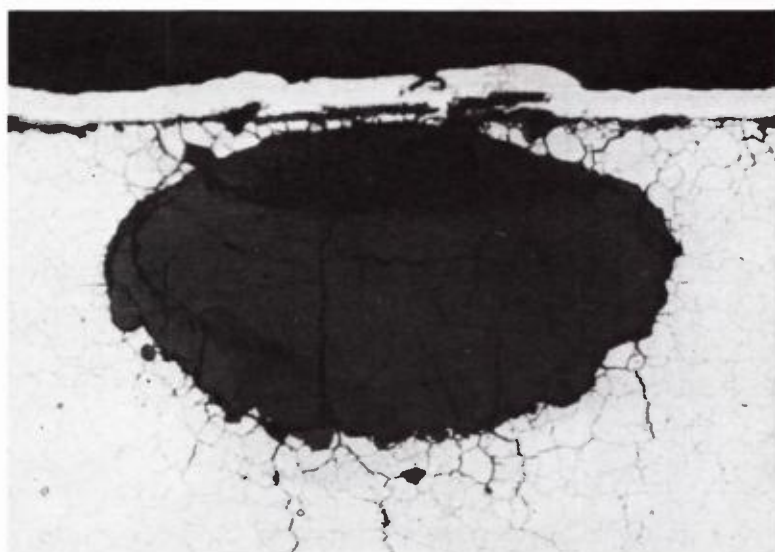
25 μm

c)



b)

50 μm



50 μm

a)

figure 3 — Principaux types de corrosion des tubes de générateurs de vapeur en alliage « 600 » :
a) Fissuration intergranulaire sous contrainte : ce mode de corrosion nécessite pour se produire la présence simultanée d'un milieu corrosif pour le matériau considéré et de contraintes mécaniques de traction.
b) Attaque intergranulaire : décohésion des joints de grains en l'absence de tout effort mécanique.
c) Piqûre.



attribuées le plus souvent à la présence de concentrations élevées en soude. Celle-ci peut provenir de la décomposition de carbonates de certaines eaux de rivière de refroidissement lorsque le condenseur de la centrale n'est pas étanche ; elle peut aussi résulter de transformations chimiques des phosphates alcalins ajoutés au milieu pour réduire la corrosion généralisée du fer, suivant une pratique courante dans les chaudières conventionnelles, notamment en cas de risque de pénétration d'eau de mer par le condenseur (figure 1).

Des amincissements, entraînant quelquefois même le percement des tubes, ont aussi été constatés. Ils sont dus à la très forte concentration locale de phosphates sur la plaque à tubes ou au niveau des cintres, entraînant une corrosion rapide des tubes.

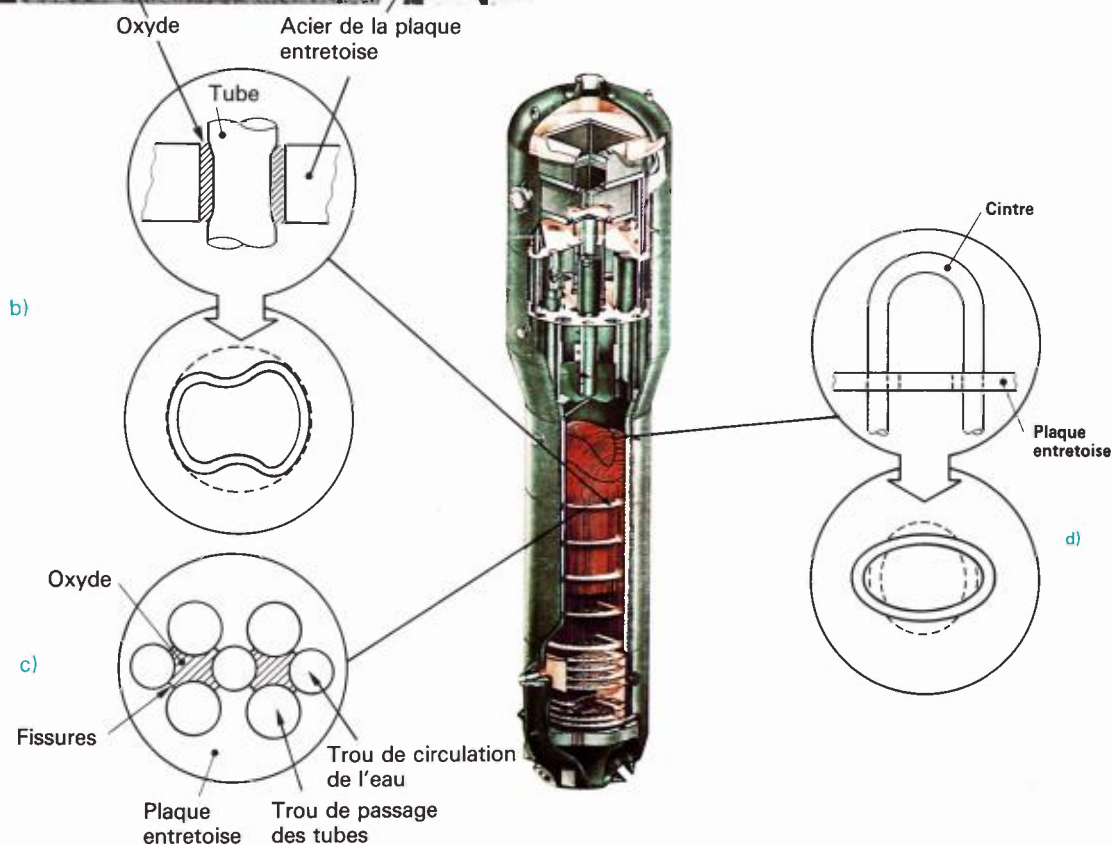


figure 4 — **Mécanisme du phénomène de striction des tubes de générateurs de vapeur ou « denting ».** Ce phénomène comprend les phases successives suivantes :

- I — Remplissage de l'interstice entre tube et plaque entretoise par des oxydes et des sels.
- II — Développement d'un milieu corrosif non contrôlé dans l'interstice.
- III — Corrosion accélérée de l'acier de la plaque (a).
- IV — Écrasement du tube (b), pouvant aller jusqu'à fissuration.
Fissuration et déformation de la plaque (c).
Ovalisation des cintres (d), pouvant aller jusqu'à fissuration.

Les mesures décidées pour lutter contre ce phénomène comprennent des spécifications plus strictes sur la chimie de l'eau (tableau III), le remplacement de l'acier non allié des plaques entretoises par un acier à 13 % de chrome beaucoup plus résistant à la corrosion et la modification de la forme des trous de passage des tubes de façon à éviter les interstices étroits (trous en forme de trèfle à 4 feuilles).

A la suite de la recommandation par plusieurs constructeurs de ne plus utiliser de phosphate pour traiter l'eau, un phénomène nouveau est apparu en 1975, connu sous le nom de « **Denting** » ou striction des tubes, au passage de ceux-ci dans les plaques entretoises qui les maintiennent (figure 4).

Différentes formes de corrosion intergranulaire ont également affecté les tubes (figure 3b) : les unes se sont produites à chaud et ont été attribuées à des concentrations de soude ; les autres se sont manifestées en période d'arrêt des centrales, souvent en présence de produits contenant du soufre, lorsque les tubes présentaient, du fait des traitements thermiques subis, des zones appauvries en chrome au voisinage des joints de grains.

Des piqûres profondes et même perforantes se sont formées en service sur les tubes en alliage « 600 » de plusieurs réacteurs américains ayant fonctionné avec des conditions de chimie de l'eau secondaire particulièrement mauvaises (figure 3c). Le même alliage s'est aussi avéré particulièrement sensible à la corrosion par piqûres à température ambiante lorsque les tubes sont conservés en atmosphère humide polluée par des chlorures ou du dioxyde de soufre (stockage en atelier, transport).

Enfin, après des durées de fonctionnement variables, les tubes en alliage « 600 » de plusieurs réacteurs à eau pressurisée ont présenté des **fissures amorcées à partir de l'intérieur** et localisées dans les zones où les contraintes mécaniques sont les plus élevées. Ces fissures ont été attribuées à un phénomène de corrosion sous contrainte, bien que la composition chimique du milieu n'ait généralement pas été considérée comme susceptible de provoquer ce type de corrosion sur les alliages inoxydables. En fait, dès 1959, H. CORIOU, du Commissariat à l'Energie Atomique, avait attiré l'attention sur le risque de fissuration de l'alliage « 600 » sous très fortes contraintes de tension dans l'eau pure à haute température. Ces résultats ont donné lieu à de longues controverses entre laboratoires pendant près de 20 ans, mais le phénomène est maintenant reconnu, bien que son mécanisme n'ait jamais été clairement expliqué. Ce risque de fissuration dans l'eau pure, après des

durées qui peuvent être extrêmement longues, est certainement le point le plus préoccupant pour le comportement des générateurs de vapeur équipés de tubes en alliage « 600 ». Plusieurs parmi les premières centrales françaises en sont actuellement affectées.

les remèdes

L'endommagement des tubes de générateurs de vapeur par corrosion met en cause, on le voit, de nombreux phénomènes différents. Le graphique de la figure 5 résume les principaux facteurs susceptibles d'avoir une influence directe ou indirecte sur la corrosion. C'est sur tous ces facteurs qu'il faut agir pour diminuer les risques d'incidents. On distinguera successivement les améliorations qui ont porté sur la composition chimique du milieu « secondaire » au voisinage des tubes, le niveau des contraintes mécaniques dans les tubes et le matériau même de ces tubes.

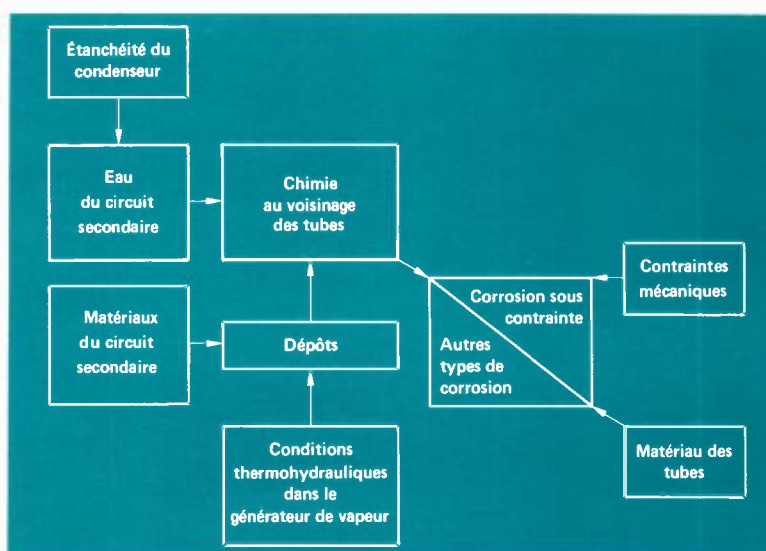


figure 5 — Facteurs influençant la tenue à la corrosion des tubes de générateurs de vapeur.

les actions sur la composition chimique du milieu « secondaire » au voisinage des tubes

Pour comprendre la plupart des corrosions qui se sont produites côté « secondaire » dans les centrales en fonctionnement, il est nécessaire de prendre en compte la décomposition chimique de l'eau au contact même des tubes.

En effet, l'ébullition qui se produit le long des tubes conduit à la concentration des espèces chimiques non volatiles contenues dans l'eau. Lorsque la vitesse de circulation du réfrigérant est suffisante, il ne peut y avoir accumulation de ces espèces sur les parois des tubes. Par contre, dans les zones où cette vitesse est faible, ou dans les interstices étroits, les espèces chimiques peu solubles ainsi que les oxydes en suspension peuvent former des dépôts sur les tubes. Leur température de surface augmente alors et les impuretés très solubles comme la soude s'y concentrent jusqu'à atteindre des teneurs relativement importantes (figure 6).

Pour lutter contre ce phénomène, différentes actions ont été entreprises :

Des modifications diverses de conception ont permis d'améliorer la circulation de l'eau dans l'appareil et de supprimer dans toute la mesure du possible les interstices étroits.

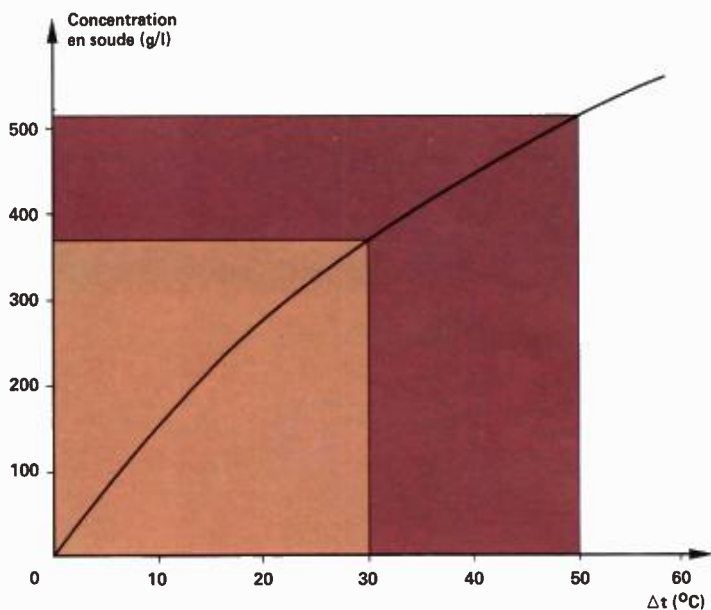


figure 6 — Concentration en soude qui peut être atteinte au voisinage des tubes en fonction de la différence de température Δt entre la surface du tube et l'eau.

L'acier inoxydable a été adopté pour les tubes de différents échangeurs du circuit secondaire reliés au générateur de vapeur, afin de diminuer la quantité d'oxydes présents dans l'eau.

Le traitement de l'eau par les phosphates, responsable de l'amincissement des tubes et de la formation de dépôts importants, a été remplacé par un traitement alcalin utilisant un produit volatil, ammoniacque ou morpholine.

tableau III — Spécifications d'EDF concernant l'eau du circuit secondaire (fonctionnement normal en puissance).

Paramètre	Eau d'alimentation des générateurs de vapeur	Eau de la purge des générateurs de vapeur	
	Valeur limite	Valeur attendue	Valeur limite
Conductivité cationique* (uS/cm)	—	≤0,8	≤1,2
pH	Traitement à la morpholine : 9,1 à 9,3	8,5 à 9,3	
	Traitement à l'ammoniaque : 9,0 ± 0,2	8,5 à 9,0	
	(condenseur à tubes en alliages cuivreux) 9,3 + 0,4 - 0,2 (condenseur à tubes en titane)	8,5 à 9,6	
Teneur en sodium (µg/kg)	—	≤6	≤20
Teneur en oxygène (µg/kg)	< 5	—	—
Matières en suspension (mg/kg)	—	< 1	—

* La conductivité cationique est un indicateur des teneurs en chlorures et en sulfates.

Enfin, la chimie de l'eau a été sévèrement contrôlée. Les spécifications établies pour les centrales d'E.D.F. exigent le maintien d'une eau très pure (tableau III). En particulier, en cas de dépassement des limites imposées, des durées maximales de fonctionnement dépendant du niveau de pollution sont fixées (figure 7). Ces spécifications devraient permettre de diminuer très fortement les risques de fissuration en milieu caustique ou en présence de produits soufrés, d'attaque intergranulaire, de corrosion par piqûres et de denting.

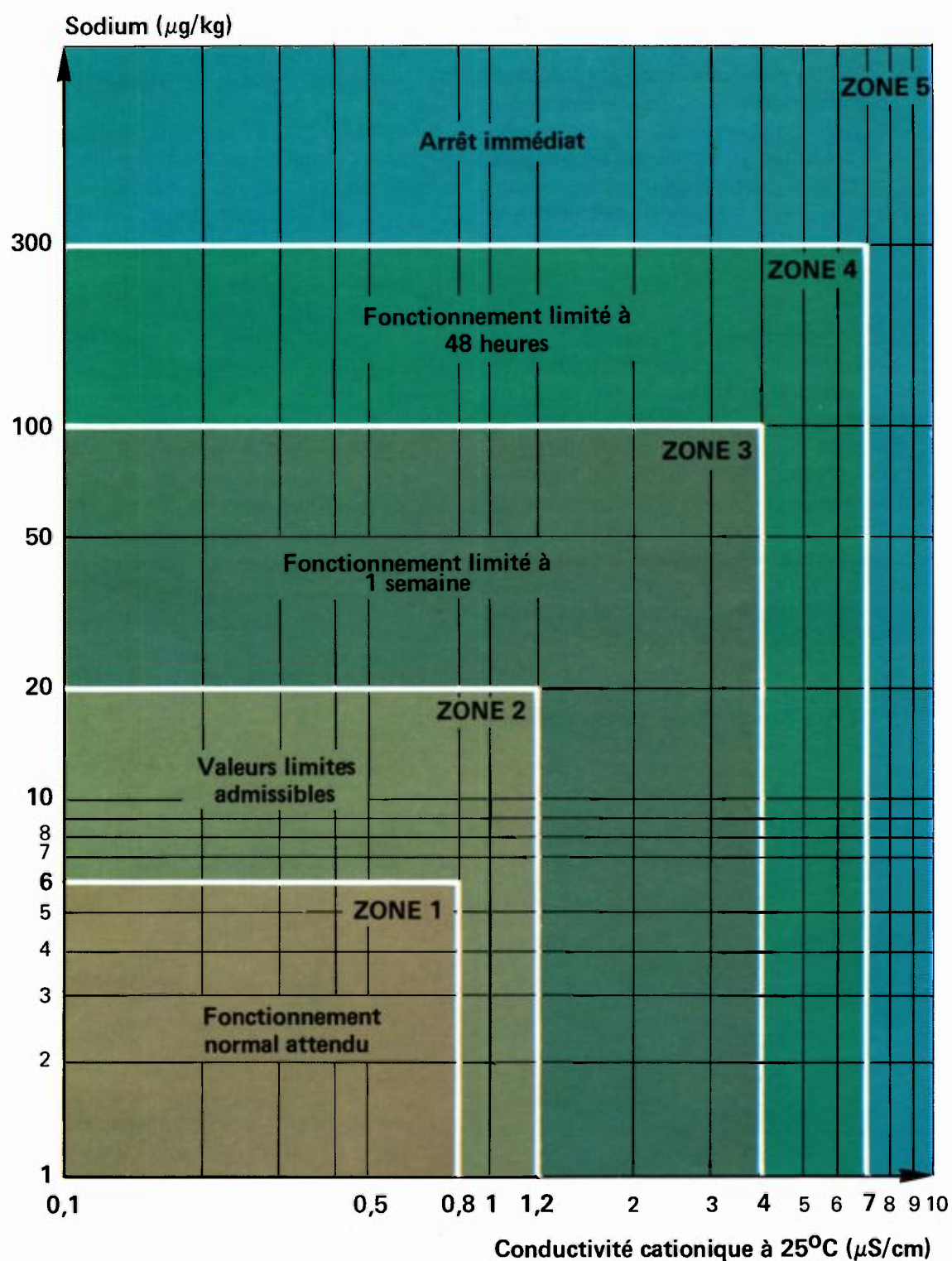


figure 7 — Durée de fonctionnement autorisé en fonction de la qualité de l'eau des générateurs de vapeur (document du Service de la Production Thermique).

Pour les spécialistes...

En complément de ces consignes, une notion nouvelle a été introduite en France pour limiter le risque d'apparition du denting : celle de « pollution intégrée ». La somme des valeurs de la conductivité cationique mesurées chaque jour pendant la durée d'un cycle de fonctionnement ne peut dépasser un maximum imposé. Ceci conduit, par exemple, à interdire le fonctionnement en continu d'une centrale lorsque la qualité de l'eau se trouve dans la zone 2 de la figure, et ceci bien qu'elle satisfasse alors les valeurs limites admissibles.

Leur respect exige toutefois des purges importantes de l'eau des générateurs de vapeur et une très bonne étanchéité du condenseur, surtout en cas de réfrigération par l'eau de mer. La fuite maximale tolérée dans ce cas est extrêmement faible, de l'ordre de 0,25 l/h, niveau auquel il est très difficile de repérer le tube défectueux parmi les mille kilomètres de tubes que contient un condenseur. Une amélioration a été apportée par adoption de tubes en titane et de doubles plaques à tubes.

Ces conditions sont sévères pour l'exploitant, mais les valeurs autorisées ne paraissent pas pouvoir être augmentées sans risque de corrosion pour les tubes en alliage « 600 ».

comment réduire les contraintes mécaniques supportées par les tubes

Les contraintes auxquelles sont soumis les tubes de générateurs de vapeur ne sont pas seulement celles dues à la pression ou aux différences de température ; en effet, les déformations imposées au cours de la fabrication peuvent introduire dans les tubes des contraintes dites résiduelles, d'un niveau beaucoup plus élevé que les contraintes de service proprement dites. C'est notamment ce qui se produit lors du dressage, du cintrage et du dudgeonnage (figures 2 et 8).

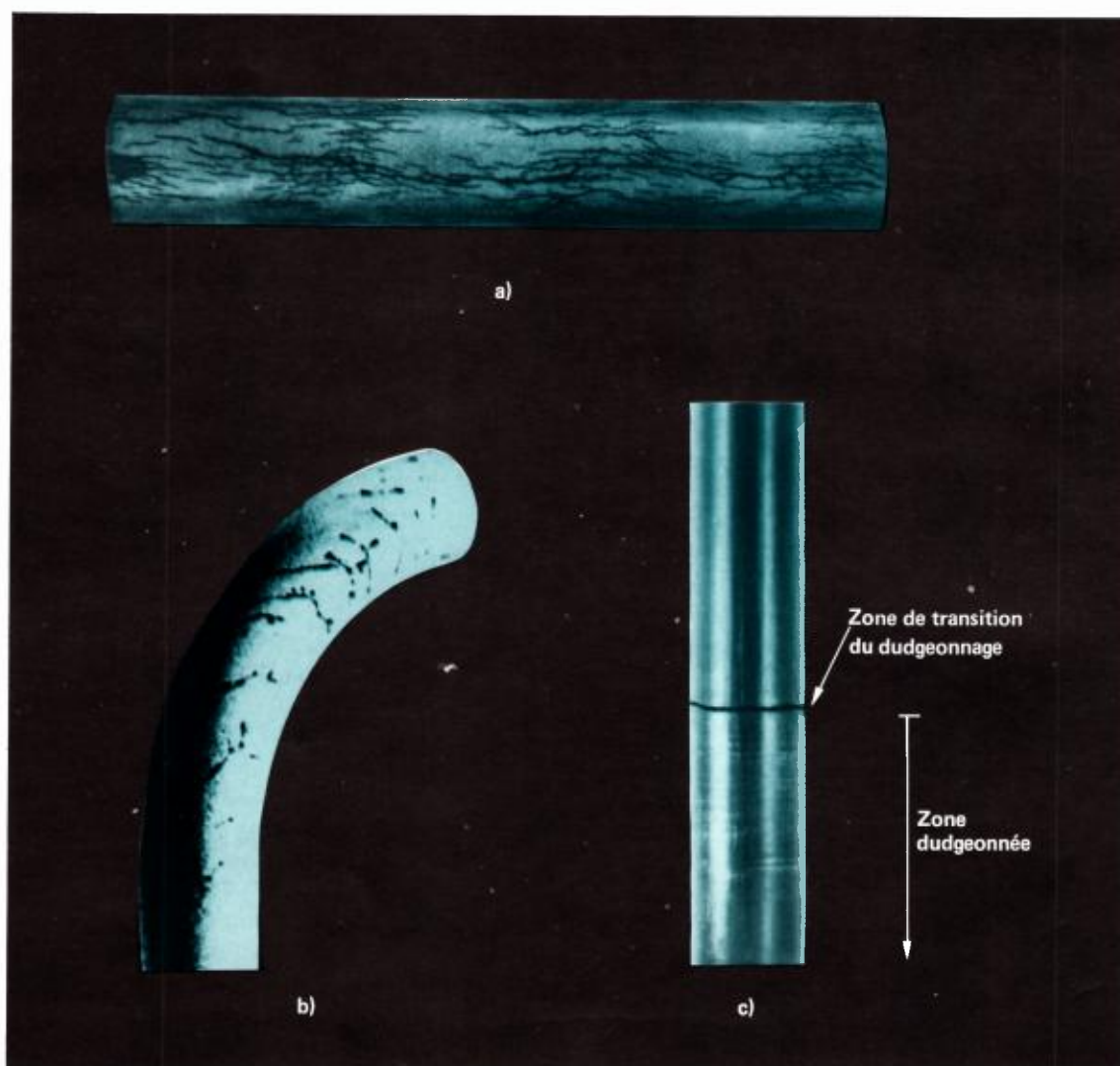


figure 8 — Contraintes résiduelles de tension introduites en surface externe des tubes de générateurs de vapeur par la fabrication et la mise en oeuvre.

Ces contraintes sont ici mises en évidence sur des tubes en acier inoxydable par une immersion de 24 h dans le chlorure de magnésium bouillant, faisant apparaître des fissures dès que la contrainte dépasse 150 MPa.

- a) Contraintes introduites par le dressage.
- b) Contraintes dans un cintre de petit rayon.
- c) Contraintes dans une zone de transition de dudgeonnage.

La première action entreprise en vue d'améliorer la résistance des tubes à la corrosion sous contrainte a consisté à étudier différents moyens de réduire ces contraintes résiduelles. Cette relaxation, aussi appelée détensionnement, peut être obtenue soit par chauffage à une température suffisante, soit de façon mécanique en faisant subir une déformation appropriée à la zone concernée.

Le traitement thermique global du générateur de vapeur a tout d'abord été considéré car il offre l'avantage de traiter dans une même opération les tubes et les dudgeonnages. Mais la température du traitement est limitée à 600°C par la présence de l'acier faiblement allié de l'enveloppe et des plaques à tubes qui ne peut être chauffé au-delà sans perdre sa résistance mécanique ; dans ces conditions, la relaxation du faisceau est relativement faible.

Pour cette raison, on a préféré recourir au traitement séparé des différentes parties du faisceau à des stades appropriés de la fabrication.

Pour les parties droites des tubes et les cintres, deux procédés se sont finalement révélés efficaces :

Le premier est le grenaillage de précontrainte ou shot-peening, pratiqué en Allemagne, qui consiste à introduire des contraintes de compression élevées en surface des tubes par l'impact répété de microbilles de verre. Dans le cas des tubes relativement minces des générateurs de vapeur, le procédé doit pouvoir être appliqué en surface externe sans augmenter en contrepartie les contraintes de tension en surface interne, ce qui exige un réglage délicat. De plus, une déformation ultérieure du tube en détruit l'effet et on peut même se trouver dans les dudgeonnages en présence de tensions plus élevées que sur un tube non grenaillé.

Le second procédé est le traitement thermique des tubes. Une relaxation satisfaisante et suffisamment rapide des contraintes peut être obtenue par traitement thermique à température supérieure ou égale à 700°C. Le détensionnement des cintres peut être réalisé soit par chauffage flash par effet

Joule au voisinage de 900°C, soit pendant une durée plus longue aux environs de 700°C dans un four de grande dimension. Cette dernière solution permet de mieux contrôler la distorsion des tubes, le risque de pollution de surface et l'évolution de la structure métallurgique au cours du traitement. Elle présente en outre, pour l'alliage « 600 », d'autres avantages qui seront vus plus loin.

En ce qui concerne **les dudgeonnages** (figure 2), on a tout d'abord cherché à modifier le procédé pour éviter d'introduire des contraintes de tension trop élevées. Les essais ont porté sur des améliorations de l'outillage et sur d'autres techniques telles que le dudgeonnage hydraulique, par explosion ou par bague plastique expansible. Dans tous les cas, la conclusion a été la même : une réduction significative des contraintes ne peut être obtenue qu'aux dépens d'une perte d'étanchéité. Compte tenu des conséquences possibles de l'existence d'un interstice étroit entre plaque et tube sur la tenue à la corrosion, il a été jugé délicat de poursuivre dans cette voie.

Les recherches ont alors porté sur la mise au point d'une méthode de chauffage de l'intérieur du tube dans la zone concernée par induction ou lampe radiante. Mais il est apparu rapidement qu'on ne peut éviter d'introduire ainsi des différences de température importantes à travers la paroi du tube, ce qui crée au refroidissement des tensions en surface interne du même ordre de grandeur que celles que l'on cherche à relaxer.

En définitive, une solution a été trouvée sous la forme d'un détensionnement mécanique local : une relaxation suffisante des contraintes en surface externe du tube dans la zone de transition du dudgeonnage peut être obtenue suivant différentes techniques, dont le point commun est d'imposer une petite déformation diamétrale de la zone concernée, par exemple par l'introduction

d'un outil de forme appropriée. Ce procédé, connu sous le nom de « Dudgeonnage Amélioré Mécaniquement » ou DAM (figure 2), a été breveté par E.D.F. et appliqué industriellement par Framatome depuis 1978. Les contraintes en surface interne n'étant toutefois pas suffisamment réduites par ce procédé, de nouvelles études ont été entreprises pour tenter de limiter le risque de corrosion sous contrainte en milieu « primaire » dans les centrales en service. Un procédé de micro-martelage local à l'aide d'une brosse tournante portant des billes de grenailage, en cours de mise au point dans nos laboratoires, a donné récemment des résultats très encourageants justifiant son application en centrales à titre expérimental (figure 9).

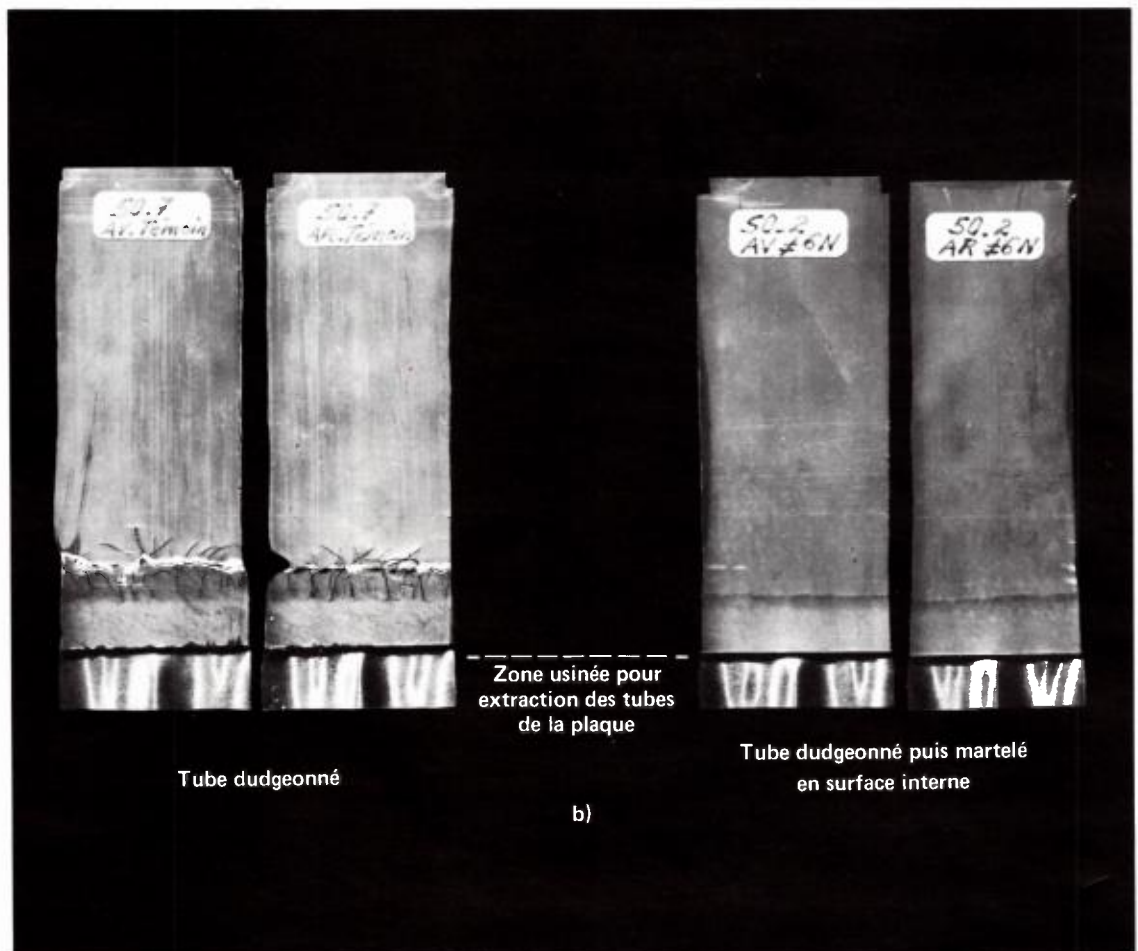
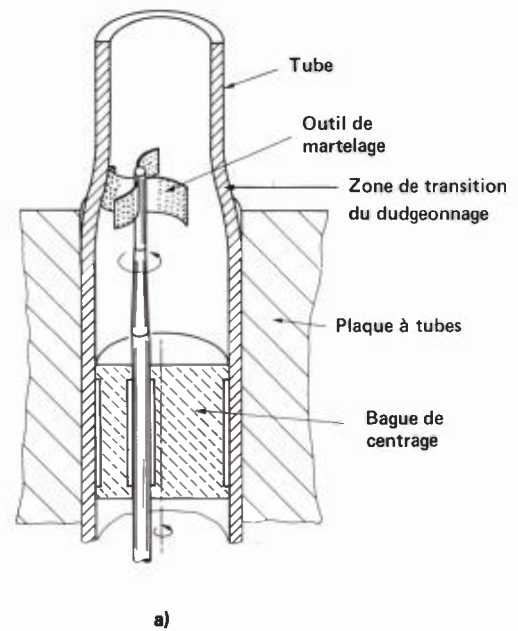


figure 9 — Réduction par « micromartelage » à la bille de verre des contraintes de tension en surface interne des tubes de générateurs de vapeur, dans la zone de transition de dudgeonnage.

a) Principe du procédé.

b) Evaluation de l'efficacité du procédé par l'essai dans le chlorure de magnésium.

les essais pour sélectionner le meilleur alliage

Tous les alliages présentés dans le tableau II ont été soumis en laboratoire à de très nombreux essais destinés à évaluer leur comportement comparatif vis-à-vis des différents phénomènes de corrosion énumérés plus haut. Le C.E.A., E.D.F., Framatome et Westinghouse ont coopéré à ce travail, qui s'est enrichi par ailleurs de contacts avec de nombreux autres laboratoires étrangers.

Les essais sont en effet particulièrement délicats à conduire et à interpréter. Si on prend l'exemple de la fissuration dans la soude, on voit (figure 10) que l'alliage le plus résistant à la concentration de 40 g/l n'est pas le même qu'à la concentration de 4 g/l. Ce comportement dépend encore de la contrainte appliquée.

La présence d'additifs ou d'impuretés peut également changer considérablement l'agressivité des milieux chimiques. Ainsi, l'alliage « 600 » résiste remarquablement dans les solutions chlorurées, même à 350° C, mais l'addition d'acide borique suffit par exemple à déclencher la fissuration à 100° C.

Enfin, de petites variations dans la composition chimique des alliages ou des différences dans leurs conditions de traitement thermique peuvent modifier sensiblement leur comportement. Il a ainsi été découvert que le traitement à 700° C envisagé plus haut pour relaxer les contraintes résiduelles des tubes en alliage « 600 » peut apporter, indépendamment de l'effet de détensionnement, une amélioration intrinsèque de sa résistance à la corrosion dans la soude (figure 10), dans l'eau pure et dans les milieux soufrés. Cet effet additionnel a contribué à préférer le traitement à 700° C parmi les autres façons possibles de relaxer les contraintes des tubes. Il a été appliqué industriellement d'abord par Westinghouse

fin 1977, puis en France par Vallourec en 1979 et enfin par plusieurs autres fabricants étrangers.

Il faut enfin tenir compte, dans la comparaison des propriétés des tubes, de facteurs autres que ceux qui ont été considérés jusqu'ici, et notamment de leurs caractéristiques mécaniques, importantes pour le dimensionnement en conditions normales et accidentelles, de leurs caractéristiques thermiques et de la quantité de produits de corrosion qu'ils relâchent dans le circuit primaire, influant sur la radioactivité de ce circuit.

On a tenté, malgré ces difficultés, de résumer dans le tableau IV les principaux avantages et inconvénients respectifs des matériaux considérés. On constate que le choix est difficile, aucun alliage ne pouvant à lui seul satisfaire tous les critères. Il ressort néanmoins que par rapport à l'alliage « 600 » traité

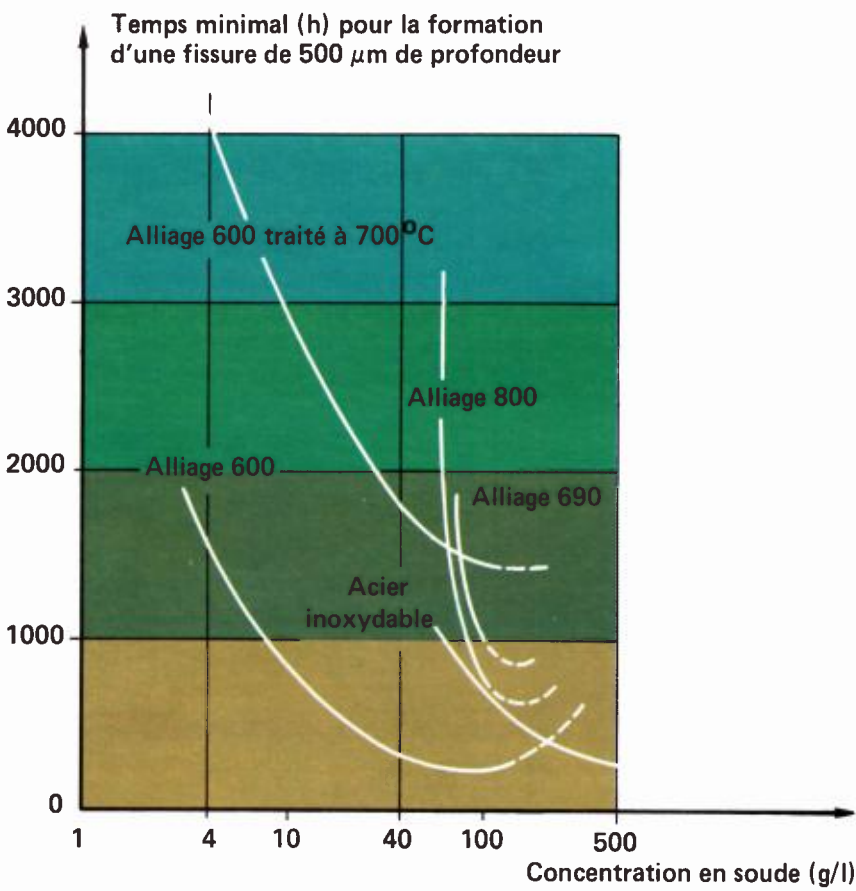


figure 10 — Résistance à la fissuration sous contrainte de différents alliages pour tubes de générateurs de vapeur dans la soude désaérée à 350 °C, sous une contrainte égale à leur limite d'élasticité.

thermiquement à 700° C actuellement utilisé dans les centrales françaises, seul l'alliage « 690 » peut présenter un intérêt suffisant : son moindre taux de relâchement de produits de corrosion dans le milieu « primaire » et l'absence de risque de fissuration sous contrainte dans l'eau pure et les solutions caustiques de faible concentration apparaissent être des avantages assez importants pour décider de l'emploi de cet alliage dans les centrales futures, malgré son peu de références industrielles.

conclusion

L'expérience de fonctionnement des réacteurs à eau pressurisée de forte puissance a montré que le générateur de vapeur, affecté de nombreuses avaries par corrosion, était incontestablement un point critique pour la fiabilité de la centrale.

L'alliage « 600 » choisi aux Etats-Unis comme matériau des tubes après l'acier inoxydable s'est en particulier révélé sensible à la fissuration sous forte contrainte au contact de l'eau, même en l'absence de toute impureté accidentelle.

Dans ces conditions, il était essentiel de s'attaquer avec urgence à la résolution de ces problèmes.

Les recherches entreprises à ce sujet depuis 10 ans ont effectivement permis d'introduire progressivement de nombreuses améliorations :

Les contraintes mécaniques de fabrication des composants ont tout d'abord été réduites au maximum par des traitements appropriés.

Dans le même temps, la circulation de l'eau dans les générateurs de vapeur a été mieux étudiée et sa chimie contrôlée de façon draconienne pour éviter les effets additionnels néfastes d'éléments polluants, dangereux même en très faible quantité.

En dernier lieu, des changements de matériaux, et notamment l'adoption de l'alliage « 690 » pour les tubes, ont été décidés pour disposer d'une garantie supplémentaire.

Il est raisonnable de penser que l'ensemble de ces mesures devrait permettre à l'avenir de maîtriser complètement les difficultés rencontrées.

	Résistance à la corrosion				Relâchement de produits de corrosion dans le milieu primaire	Propriétés mécaniques de traction	Propriétés thermiques	
	Eau pure ou soude diluée (< 4 g/l)	Soude concentrée (100 g/l)	Chlorures	Corrosion à basse température (1)			Dilatation/acier au carbone (2)	Conductivité
Acier inoxydable 18 % Cr - 10 % Ni								
Acier inoxydable biphasé								
Alliage « 600 »								
Alliage « 600 » traité à 700° C								
Alliage « 800 »								
Alliage « 690 » traité à 700° C								

Excellent, ou tout au moins le meilleur des alliages considérés

Satisfaisant - Suffit à l'emploi

Moins bon que les précédents. Peut nécessiter des mesures particulières

Peut entraîner un risque grave d'avarie

(1) Piqûres et corrosion intergranulaire en présence de zones déchromées aux joints de grains.
(2) Une trop grande différence de coefficient de dilatation entre le métal du tube et celui de la plaque à tubes peut nuire à la bonne tenue des dudgeonnages.
(3) Comportement à l'état « vieilli », cet alliage ayant une structure métallurgique qui évolue défavorablement à la température de service.

Glossaire des termes techniques

boîte à eau — Compartiment situé à l'entrée d'un échangeur, contre la plaque à tubes, et à partir duquel l'eau pénètre dans le faisceau de tubes (figure 1).

cintrage — Opération consistant à donner à un tube la forme d'un U.

circuit primaire — Circuit fermé d'eau sous pression chauffée par le cœur nucléaire et échangeant sa chaleur avec l'eau du circuit secondaire dans le générateur de vapeur (figure 1).

circuit secondaire — Circuit d'eau se vaporisant dans le générateur de vapeur, la vapeur produite servant à actionner la turbine (figure 1).

condenseur — Echangeur du circuit secondaire où la vapeur, après traversée de la turbine, est refroidie et condensée sous pression réduite au contact de tubes parcourus par l'eau d'un circuit de réfrigération (figure 1).

contraintes résiduelles — Contraintes mécaniques internes de tension et de compression équilibrées existant dans une pièce en l'absence de tout effort extérieur.

corrosion intergranulaire — Forme de corrosion se traduisant par une décohésion des grains dont est constitué un métal (figure 3b).

corrosion sous contrainte — Fissuration d'un métal se produisant sous l'effet conjugué d'un milieu chimique et de tensions mécaniques (figure 3a).

denting — Phénomène d'étranglement des tubes au niveau des trous de passage dans les plaques entretoises, résultat d'une corrosion accélérée du métal de ces plaques (figure 4).

détensionnement — Opération consistant à réduire les contraintes résiduelles induites par la fabrication dans une pièce.

dressage — Opération destinée à rendre des tubes parfaitement rectilignes par passage entre des séries de galets.

dudgeonnage — Opération d'assemblage d'un tube dans une plaque à tubes (figure 2).

faisceau — Ensemble des tubes d'un échangeur (figure 1).

générateur de vapeur — Dans une centrale thermique classique ou nucléaire, échangeur utilisant la chaleur fournie par le combustible pour produire la vaporisation de l'eau du circuit secondaire (figure 1).

grenailage — Opération consistant à produire des contraintes mécaniques de compression à la surface d'une pièce par l'impact de petites billes de verre, d'oxydes durs ou d'acier. On dit aussi « micromartelage ».

piqûre — Corrosion localisée d'un métal se traduisant par la formation de petites cavités (figure 3c).

plaque à tubes — Plaque percée d'orifices cylindriques à l'intérieur desquels sont fixés les tubes du faisceau d'un échangeur (figure 1).

plaques entretoises — Plaques régulièrement réparties le long du faisceau d'un échangeur, destinées à maintenir l'espace entre les tubes et à limiter les vibrations ; ces plaques sont percées de trous pour le passage des tubes et la circulation de l'eau (figures 1 et 4).

zone de transition du dudgeonnage — Zone de transition entre la partie non déformée du tube et la partie élargie par l'opération de dudgeonnage.