

Attention Microfiche User,

The original document from which this microfiche was made was found to contain some imperfection or imperfections that reduce full comprehension of some of the text despite the good technical quality of the microfiche itself. The imperfections may be:

- missing or illegible pages/figures
- wrong pagination
- poor overall printing quality, etc.

We normally refuse to microfiche such a document and request a replacement document (or pages) from the National INIS Centre concerned. However, our experience shows that many months pass before such documents are replaced. Sometimes the Centre is not able to supply a better copy or, in some cases, the pages that were supposed to be missing correspond to a wrong pagination only. We feel that it is better to proceed with distributing the microfiche made of these documents than to withhold them till the imperfections are removed. If the removals are subsequently made then replacement microfiche can be issued. In line with this approach then, our specific practice for microfiching documents with imperfections is as follows:

1. A microfiche of an imperfect document will be marked with a special symbol (black circle) on the left of the title. This symbol will appear on all masters and copies of the document (1st fiche and trailer fiches) even if the imperfection is on one fiche of the report only.
2. If imperfection is not too general the reason will be specified on a sheet such as this, in the space below.
3. The microfiche will be considered as temporary, but sold at the normal price. Replacements, if they can be issued, will be available for purchase at the regular price.
4. A new document will be requested from the supplying Centre.
5. If the Centre can supply the necessary pages/document a new master fiche will be made to permit production of any replacement microfiche that may be requested.

The original document from which this microfiche has been prepared has these imperfections:

- missing pages/figures numbered: MANY PAGES MISSING (about 20).
- wrong pagination
- poor overall printing quality
- combinations of the above
- other

INIS Clearinghouse
IAEA
P. O. Box 100
A-1400, Vienna, Austria

FR8600854

EDF-84H530882



DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES

P. VIDAL

10 AVRIL 1984

REDUCTION DES CONTRAINTES RESIDUELLES DE TENSION EN
PEAU INTERNE DES ZONES DE TRANSITION DE DUDGEONNAGE
DES TUBES DE GENERATEURS DE VAPEUR DE REACTEURS A
PRESSURISEE : ESSAIS A L'AIDE D'UN OUTIL DU TYPE
"BROSSE TOURNANTE".

HT/PV G 194 MAT/T 44

33 pages

ÉLECTRICITÉ DE FRANCE
DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES

Service Réacteurs Nucléaires et Échangeurs

DÉPARTEMENT ÉTUDE DES MATÉRIAUX

LES RENARDIÈRES ROUTE DE SENS

77 ECUELLES TEL. 070.68.20

P. VIDAL

10 AVRIL 1984

REDUCTION DES CONTRAINTES RESIDUELLES DE TENSION EN
PEAU INTERNE DES ZONES DE TRANSITION DE DUDGEONNAGE
DES TUBES DE GENERATEURS DE VAPEUR DE REACTEURS A EAU
PRESSURISEE : ESSAIS A L'AIDE D'UN OUTIL DU TYPE
"BROSSE TOURNANTE".

HT/PV G 194 MAT/T 44

53 pages

Résumé

Un procédé visant à empêcher ou à enrayer la fissuration par corrosion sous tension côté primaire dans les zones dudgeonnées de tubes de générateurs de vapeur de centrales à eau pressurisée a été étudié. Ce procédé consiste à marteler la peau interne des tubes dans ces zones, abaissant ainsi le niveau des tensions résiduelles de dudgeonnage à des valeurs inférieures à 100-150 MPa en peau interne sans modifier le niveau de contrainte en peau externe.

Accessibilité	
Diff. EMA	
Diff. EDF	X
Diff. libre	

DEPARTEMENT ETUDE DES MATERIAUX

Division Essais Physiques

Procès-verbal n° G 194 MAT/T 44

REDUCTION DES CONTRAINTES RESIDUELLES DE TENSION EN PEAU INTERNE DES ZONES
DE TRANSITION DE DUDGEONNAGE DES TUBES DE GENERATEURS DE VAPEUR
DE REACTEURS A EAU PRESSURISEE :
ESSAIS A L'AIDE D'UN OUTIL DU TYPE "BROSSE TOURNANTE"

1 - OBJET

Après 20 000 h de service environ, des fissures de corrosion sous tension ont été mises en évidence dans des tubes en Alliage 600 de certains générateurs de vapeur de réacteurs à eau pressurisée. Ces fissures se sont formées à partir de la peau interne des tubes (côté milieu primaire) dans les zones dudgeonnées par outil à galets tournants, à l'extrémité de la partie du tube laminée contre la plaque ("zone de transition de dudgeonnage"). Elles sont longitudinales et ont une longueur maximale d'environ 6 mm. Elles ont pu être observées sur des tubes simplement dudgeonnés (Bugey 3, [1]) ou sur des tubes pour lesquels le dudgeonnage a été suivi d'un détensionnement par outil à galets tournants (DAM*) visant à réduire les contraintes résiduelles de tension en peau externe (Bugey 5, [2]). Ce procédé ne supprime toutefois pas les tensions résiduelles en peau interne qui, combinées avec les contraintes de service (différence de pression entre milieu primaire et milieu secondaire principalement), sont à l'origine des fissures observées. Ces fissures ne nécessitent pas actuellement l'arrêt des réacteurs. Toutefois, si une extension de la fissuration avait

AID T4B 00 F - PEX 652 partiel
Technicien chargé : L. GUILLEMIN

* Dudgeonnage Amélioré par procédé Mécanique.

lieu, la situation pourrait être différente. Dans cette éventualité, il a été jugé nécessaire de disposer d'un moyen permettant d'éviter ou d'enrayer le phénomène.

A la demande du Service de la Production Thermique, un procédé visant à abaisser les contraintes résiduelles de tension introduites par le dudgeonnage en peau interne des tubes a été mis à l'étude au Département. Ce procédé consiste à marteler la paroi interne du tube à l'aide d'une "brosse" portant des billes de verre. L'effet obtenu est comparable à celui d'un grenailage, avec l'avantage de ne pas nécessiter d'introduction de grenaille dans la pièce ou l'appareil à traiter. Cet avantage est particulièrement important dans le cas des générateurs de vapeur des centrales ayant déjà fonctionné (ambiance radio-active).

Le présent procès-verbal rend compte des essais effectués dans le but d'évaluer le niveau des contraintes résiduelles de tension en peau interne et externe de dudgeonnages auxquels le procédé a été appliqué. On a considéré des assemblages dudgeonnés par outil à galets tournants ayant ou n'ayant pas subi après dudgeonnage l'opération mécanique visant à détensionner la peau externe des tubes (DAM).

2 - CONDITIONS GENERALES D'ESSAI

2.1. - Tubes utilisés

De façon à pouvoir évaluer les contraintes résiduelles par l'essai dans le chlorure de magnésium bouillant, cette étude a porté non pas sur des tubes en Alliage 600 mais sur des tubes en acier inoxydable austénitique 16 % Cr - 12 % Ni au molybdène à très bas carbone. Ces tubes ont été fabriqués par Vallourec à partir d'acier élaboré par Creusot-Loire, dans les mêmes dimensions (22,2 x 1,27 mm) et selon la même gamme de fabrication que les tubes en Alliage 600 pour générateurs de vapeur. Leur composition chimique, leurs caractéristiques de traction et leurs relevés dimensionnels sont donnés au tableau I. Ces tubes ont subi au laboratoire, avant dudgeonnage, un traitement thermique de détensionnement de 20 min à 880°C en four sous vide (refroidissement en four).

2.2. - Réalisation des maquettes dudgeonnées

Des maquettes ont été réalisées à l'aide de tronçons de tube de 100 mm de long dudgeonnés dans des blocs cylindriques en acier 16 % Cr - 12 % Ni au molybdène (diamètre extérieur du bloc 44 mm, hauteur 48 mm).

TABLEAU I – CARACTERISTIQUES DES TUBES EN ACIER 18% Cr-12% Ni AU MOLYBDENE UTILISÉS
(coulée T 0338, repère EMA U 174).

a) Composition chimique (% en poids).

	C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Co	Ti	Cu	Al	Mo	N
Résultats EMA	0,026	0,008	0,026	0,48	1,71	17,6	12,4	0,12	<0,01	0,12	0,03	2,50	0,093

b) Caractéristiques de traction à température ambiante à l'état brut de dressage.

	Re _{0,002} (MPa)	R _m (MPa)	A (%)
Résultats EMA	265	620	48

c) Résultats des contrôles dimensionnels à l'état brut de dressage.

	Diamètre extérieur (mm)		Épaisseur (mm)		
	minimum	maximum	minimum	moyenne	maximum
Spécifications *	22,04	22,35	1,15	1,27	1,39
Résultats EMA	22,15	22,24	1,15	1,20	1,24

* des tubes en Alliage 600 pour générateurs de vapeur de centrales à eau pressurisée
(cf. procès-verbal n° D 342 MAT/T41).

On a, suivant les cas, pratiqué uniquement un dudgeonnage par outil à galets tournants (configuration des générateurs de vapeur de Fessenheim 2 à Bugey 4) ou effectué après cette opération un détensionnement mécanique de la peau externe des tubes dans les zones de transition des dudgeonnages. Ce détensionnement a été obtenu en appliquant au tube une légère déformation diamétrale à l'aide d'un outil à galets tournants à profil "non adouci"* (configuration des générateurs de vapeur de Bugey 5 à Cruas 2). Les conditions retenues pour l'exécution des maquettes sont les suivantes :

- Pour le dudgeonnage :

- . dudgeon Aire Tool à 4 galets, référence 1243 (Figure 1),
- . dudgeonnage manuel,
- . jeu de 0,4 mm,
- . réduction de paroi de l'ordre de $3 \times 5 \%$ (soit un couple appliqué d'environ 12 m.N),
- . dudgeonnage rentrant de 2 mm.

- Pour le détensionnement de la peau externe par outil à galets tournants (DAM) :

- . dudgeon SLECFI 5 galets à profil non adouci (figure 2),
- . dudgeonnage automatique à l'aide d'une machine SLECFI,
- . variation de diamètre $\Delta \varnothing \approx 0,14$ mm (soit 7 tours de broche),
- . milieu de la partie utile du galet de détensionnement positionné au droit de la zone de transition de dudgeonnage.

Lors de ces opérations, les maquettes ont été placées à l'extrémité d'un guide assurant une bonne coaxialité entre l'outil de dudgeonnage ou de détensionnement et le tube fixé dans la plaque (figure 3).

Ces conditions permettent d'obtenir des maquettes tout à fait représentatives des dudgeonnages exécutés pour les réacteurs.

2.3. - Martelage à l'aide de la brosse tournante

2.3.1. - Principe du procédé

Le procédé consiste à marteler la peau interne du tube à l'aide de billes de grenailage fixées sur une toile mise en rotation ; on vise

* Pour les réacteurs construits après Cruas 2, le détensionnement mécanique de la peau externe des tubes dans les zones de transition des dudgeonnages a été effectué à l'aide d'un outil dont les galets ont été usinés : l'angle avant des galets a été arrondi, ce qui leur donne un profil "adouci".

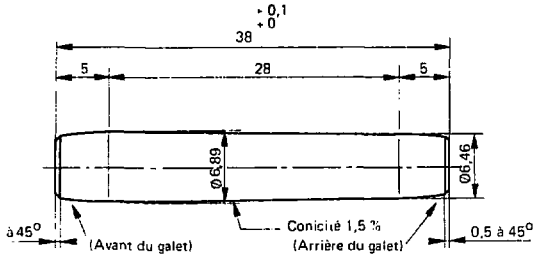


Figure 1 – Plan des galets AIRE TOOL (W16S) pour dudgeon 1243 utilisés pour le dudgeonnage des maquettes - cotes en mm.

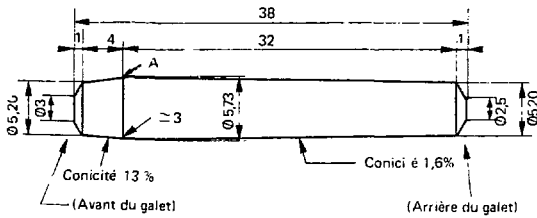


Figure 2 – Plan des galets SLECMI (profil non adouci) utilisés pour le détensionnement de la peau externe des zones dudgeonnées (DAM) - cotes en mm.

Maquette

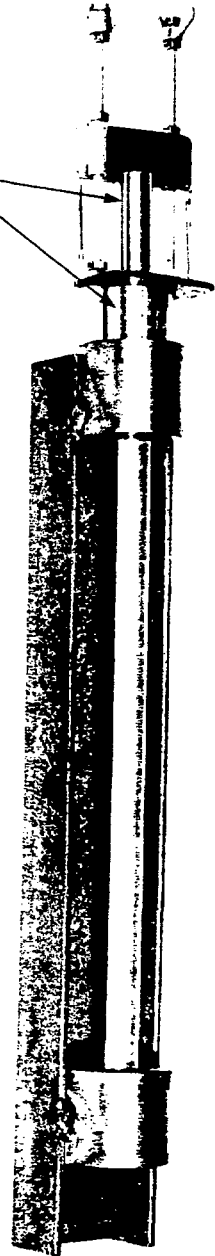


Figure 3 – Guide utilisé lors du dudgeonnage et du détensionnement des maquettes.

à produire par le choc des billes sur la surface à traiter un effet comparable à celui du grenailage (figure 4), à savoir la formation d'une couche écrouie présentant en fin d'opération des contraintes résiduelles de compression ou tout au moins des tensions plus faibles qu'au départ.

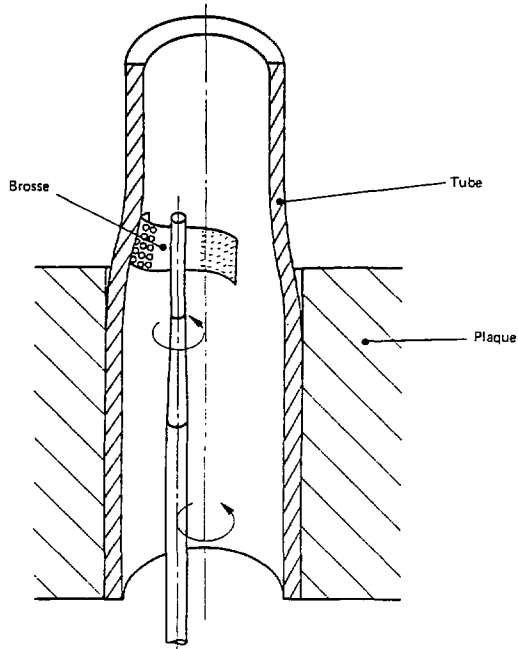


Figure 4 - Principe du procédé de martelage à l'aide de la brosse tournante.

2.3.2 - Description de l'outillage utilisé

Les brosses ont été fabriquées au département Etude des Matériaux. Elles sont constituées d'un petit rectangle de tissu de 28 x 15 mm aux extrémités duquel ont été collées des billes de grenailage en verre (figure 5). Ces billes ont été prélevées dans un lot de granulométrie comprise entre 0,425 et 0,850 mm. Pour les essais, une brosse est fixée à

l'extrémité d'un axe métallique (figure 5). Un moteur électrique à vitesse réglable entraîne en rotation, par l'intermédiaire d'un flexible, l'axe métallique portant la brosse (figure 6). Lors de l'opération, le flexible est tenu manuellement. Des bagues centrées sur l'axe portant la brosse et appuyées pendant l'opération sur la paroi interne du tube permettent de maintenir constante la distance entre l'axe et la surface à traiter (figures 5 et 6).

De manière à marteler la totalité de la circonférence du tube, les maquettes ont été, pour les essais décrits ici, entraînées en rotation lente par un mandrin tournant (figure 6). Pendant cette rotation, on déplace axialement la brosse de manière à couvrir toute la hauteur de tube à traiter (un aller-retour toutes les secondes environ).

En ce qui concerne la fabrication des brosses, les billes ont été collées sur la toile avec une colle thermodurcissante. Deux procédures de séchage de la colle ont été employées : pour un premier lot de brosses (brosses du type 1), le séchage a été effectué à l'aide d'une flamme et pour le deuxième lot (brosses du type 2) avec de l'air chaud. Lors de l'utilisation de ces brosses, il s'est avéré que les brosses du type 1 présentaient une rigidité supérieure à celles du type 2, qui ont fréquemment été trouvées repliées autour de l'axe en fin de martelage.

2.3.3. - Conditions opératoires retenues pour les essais

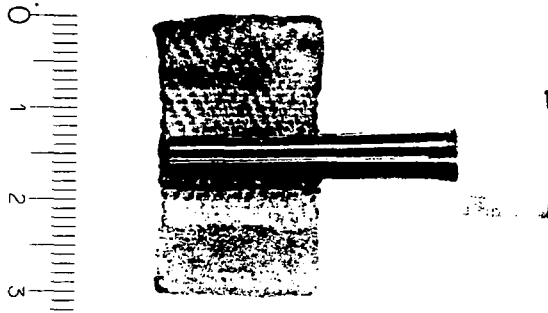
Les conditions de martelage retenues pour les maquettes ont été les suivantes :

- vitesse de rotation de l'axe de la brosse : 11 500 à 12 500 tour/min,
- distance entre l'axe de la brosse et la surface à traiter : 7 mm,
- vitesse de rotation du mandrin portant les maquettes : 0,8 tour/min,
- temps de traitement : environ 5 min, soit 4 tours de mandrin.

REMARQUES - a) Des éprouvettes Almen en acier XC 70 de 12 x 76 x 0,785 mm (épreuves Almen N) ont été traitées à l'aide de la brosse dans les conditions de martelage décrites ci-dessus (excepté en ce qui concerne le temps de traitement, réduit à 1 min, c'est-à-dire sensiblement dans le rapport des surfaces) et en déplaçant cette dernière le plus régulièrement possible sur la surface de l'éprouvette. La mesure de la flèche de l'éprouvette a conduit à une intensité Almen variant de 4 à 6 N suivant la vitesse de rotation de la brosse. Il a été vérifié



a)



b) Détail de a

Figure 5 - « Brosse » fabriquée au département Étude des Matériaux et utilisée pour les essais.

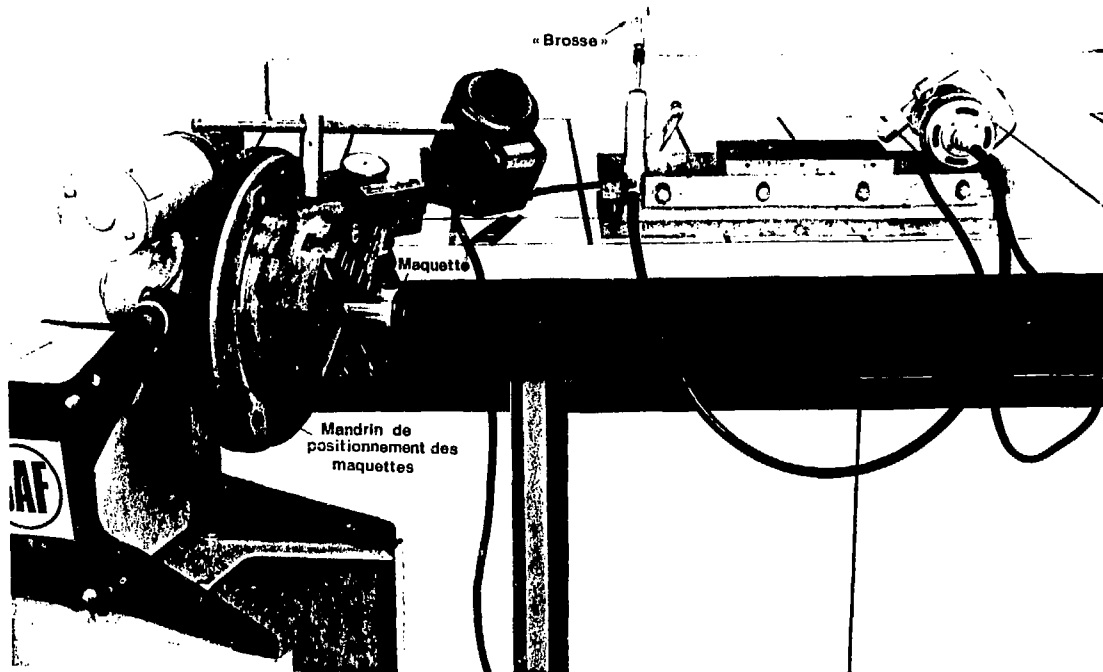


Figure 6 — Installation utilisée pour le martelage des maquettes à l'aide d'une brosse tournante.

que ces conditions conduisent pour ces éprouvettes à une saturation de l'effet de grenailage. L'augmentation du temps de traitement n'entraînant pas d'augmentation de la flèche de l'éprouvette.

b) Des essais de grenailage effectués par ailleurs ont permis de montrer que des intensités Almen de l'ordre de 3 à 6 N permettaient d'abaisser les contraintes en peau interne de tubes dudgeonnés (plus de fissuration après essai de 24 h dans le chlorure de magnésium bouillant) sans augmenter notablement les contraintes en peau externe.

c) Aucune étude d'optimisation des paramètres de martelage n'a encore été entreprise à ce stade. Des essais complémentaires devront être menés afin notamment de vérifier si des temps de traitement plus courts ne pourraient être retenus.

2.4. - Evaluation des contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles ont été évaluées par essai dans le chlorure de magnésium bouillant. Cet essai consiste à plonger pendant 24 h la pièce à étudier dans une solution aqueuse de chlorure de magnésium dont la concentration est ajustée de manière à obtenir une température d'ébullition de 154°C ; les zones sous tension se fissurent perpendiculairement au sens de la contrainte si celle-ci est supérieure, pour l'acier étudié ici, à une valeur de l'ordre de 100 à 150 MPa.

Les essais sur maquettes ont été effectués en n'exposant au réactif que la peau interne ou la peau externe des tubes, de manière à différencier les fissurations amorcées sur l'une ou l'autre des peaux.

A l'issue du maintien des maquettes dans le réactif, les tubes ont été extraits des plaques* et les éventuelles fissurations ont été mises en évidence :

- pour les essais relatifs à la peau interne, par mise à plat à l'étau du tube découpé longitudinalement en deux moitiés,
- pour les essais relatifs à la peau externe, par ressuage ; cette opération est précédée, pour en augmenter la sensibilité, d'un décapage pendant 16 h dans une solution commerciale d'acide chlorhydrique (densité 1,15) que l'on a diluée en lui ajoutant le même volume d'eau distillée.

* Pour extraire les tubes des plaques, on les usine intérieurement à la partie inférieure de la maquette sur environ 40 mm de hauteur de manière à supprimer le serrage.

3 - RESULTATS DES ESSAIS SUR MAQUETTES DUDGEONNEES NON DETENSIONNEES EN PEAU EXTERNE PAR OUTIL A GALETS TOURNANTS

3.1. - Résultats des essais en peau interne (tableau II)

Après essai dans le chlorure de magnésium, les quatre maquettes témoins non soumises au martelage à l'aide de la brosse présentent en peau interne la fissuration en feston dans la zone de transition de dudgeonnage habituellement observée (figure 7, [3]). Cette fissuration a entraîné une rupture circonférentielle du tube pour trois de ces maquettes.

Huit autres maquettes ont été soumises au martelage à l'aide des brosses. Les résultats obtenus sont les suivants :

- Quatre maquettes, martelées à l'aide d'une brosse du type 1, ne présentent aucune fissuration (figures 8a, c, d et e).
- Les quatre autres présentent chacune une ou deux fissures isolées (figures 8b, 8f, 9a et b). Il faut d'ailleurs noter que :
 - deux d'entre elles ont été martelées à l'aide de brosses du type 1 ; mais pour l'une, il a été constaté que la brosse était détériorée (perte des billes) à l'issue du martelage (figure 8b) ; pour l'autre, le dudgeonnage a été exécuté avec une forte réduction de paroi de 8,9 % (figure 8f).
 - les deux autres ont été martelées à l'aide de brosses du type 2 qui ont été trouvées repliées autour de leur axe en fin de martelage (figures 9a et b).

On peut donc conclure que lorsqu'il est effectué dans de bonnes conditions, le martelage permet de réduire notablement le niveau des contraintes résiduelles de tension en peau interne des tubes.

3.2. - Résultats des essais en peau externe (tableau III)

Après essai dans le chlorure de magnésium, les trois maquettes témoins non soumises au martelage à l'aide de la brosse présentent en peau externe la fissuration circonférentielle au niveau du dernier contact tube-plaque habituellement observée (figure 10, [3]). Cette fissuration a entraîné une rupture circonférentielle du tube pour une de ces maquettes.

TABLEAU II - RÉSULTATS DES ESSAIS DANS MgCl₂ EN PEAU INTERNE DE MAQUETTES DUDGEONNÉES (sans détensionnement de la peau externe par outil à galets tournants), MARTELÉES OU NON.

Repère de la maquette	Réduction de paroi lors du dudgeonnage (%)	Martelage à la brosse				Résultats des essais MgCl ₂
		Type de brosse*	Vitesse de rotation (tour/min)	Temps de martelage (s)	Intensité ALMEN	
50-7 (figure 7a)	3,4	Maquettes non soumises au martelage à la brosse (témoins de peau interne).				Fissuration en feston dans la zone de transition de dudgeonnage provoquant la rupture du tube pour 3 des maquettes.
49-G (figure 7b)	3,5					
50-24 (figure 7c)	4,6					
50-27 (figure 7d)	7,1					
50-16 (figure 8a)	5,5	1	11500	290	4N	Pas de fissuration
50-33 (figure 8b)	6,1	1**	11500	290	4N	Une fissure longitudinale de 5 mm s'amorçant dans la zone de transition de dudgeonnage.
50-2 (figure 8c)	3,0	1	12500	290	6N	Pas de fissuration
50-26 (figure 8d)	4,4	1	12500	290	6N	Pas de fissuration
50-29 (figure 8e)	6,8	1	12500	290	6N	Pas de fissuration
50-25 (figure 8f)	8,9	1	12500	290	6N	Legère fissuration en feston.
50-54 (figure 9a)	3,0	2	11500	290	4N	Une fissure longitudinale de 11 mm s'amorçant dans la zone de transition de dudgeonnage.
50-38 (figure 9b)	3,2	2	11500	290	4N	Une fissure en étoile au dessus de la zone de transition de dudgeonnage.

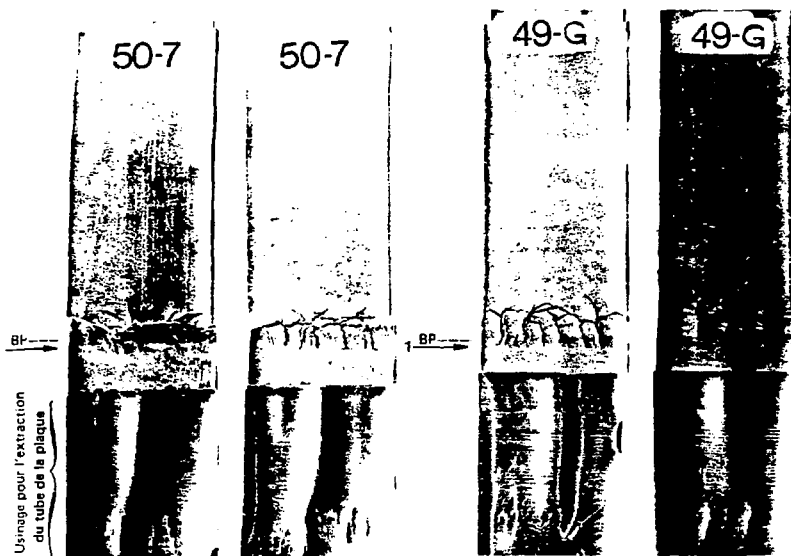
*cf. § 2.3.2

** brosse détériorée à l'issue du martelage (perte des billes).

TABLEAU III – RÉSULTATS DES ESSAIS DANS $MgCl_2$ EN PEAU EXTERNE DE MAQUETTES DUDGEONNÉES (sans détensionnement de la peau externe par outil à galets tournants), MARTELÉES OU NON.

Repère de la maquette	Réduction de porosités lors du dudgeonnage (%)	Martelage à la brosse				Résultats des essais $MgCl_2$
		Type de brosse*	Vitesse de rotation (tour/min)	Temps de martelage (s)	Intensité ALMEN	
50-23 (figure 10a)	3,8	<i>Maquettes non soumises au martelage à la brosse (témoins de peau externe)</i>				Fissure circonférencielle au dernier contact tube-plaque provoquant une rupture du tube pour une des maquettes.
50-8 (figure 10b)	4,4					
50-17 (figure 10c)	5					
50-11 (figure 11a)	3,5	1	11500	470	4N	Pas de fissure
50-18 (figure 11b)	4,7	1	11500	290	4N	Pas de fissure
50-1 (figure 11c)	3,4	1	12500	290	6N	Fissure circonférencielle au dernier contact tube-plaque.
50-28 (figure 11d)	3,8	1	12500	290	6N	Fissure circonférencielle au dernier contact tube-plaque.
50-45 (figure 12a)	3,0	2	12000	290	5N	Fissure circonférencielle au dernier contact tube-plaque.
50-37 (figure 12b)	3,6	2	12000	290	5N	Fissure circonférencielle au dernier contact tube-plaque.

*cf. § 2.3.2.



a) $R_p = 3,4 \%$

b) $R_p = 3,5 \%$

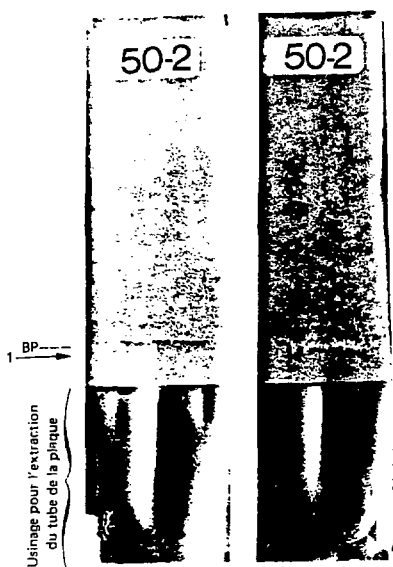


c) $R_p = 4,6 \%$

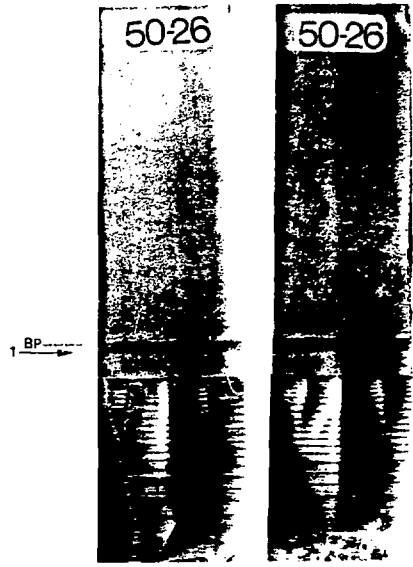
d) $R_p = 7,1 \%$

Figure 7 — Résultats des essais dans $MgCl_2$ en peau interne sur des maquettes dudgeonnées (sans DAM) et non martelées à la brosse (maquettes témoins).

BP----- : bord de plaque ; 1 → : position de l'angle avant du galet de dudgeonnage



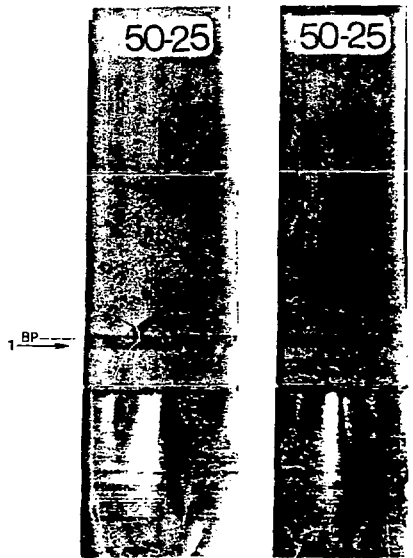
c) $R_p = 3,0\%$, martelage avec une intensité de 6 N.



d) $R_p = 4,4\%$, martelage avec une intensité de 6 N.



e) $R_p = 6,8\%$, martelage avec une intensité de 6 N.



f) $R_p = 8,9\%$, martelage avec une intensité de 6 N.

Figure 8 (suite) – Résultats des essais dans $MgCl_2$ en peau interne de maquettes dudgeonnées (sans DAM) et martelées à l'aide d'une brosse de type 1.

BP----- : bord de plaque ; 1 --- : position de l'angle avant du galet de dudgeonnage
 R_p : réduction de porosité lors du dudgeonnage

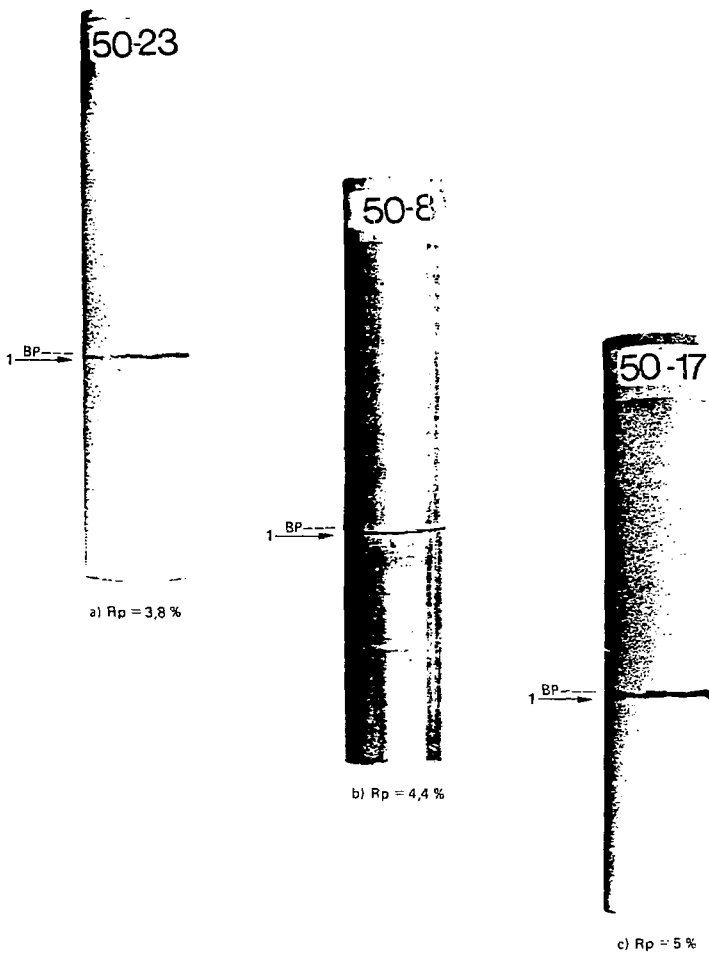
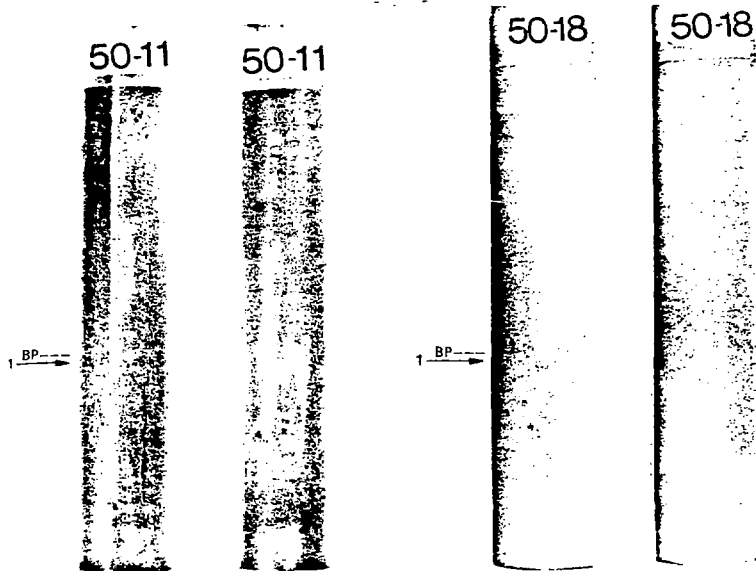


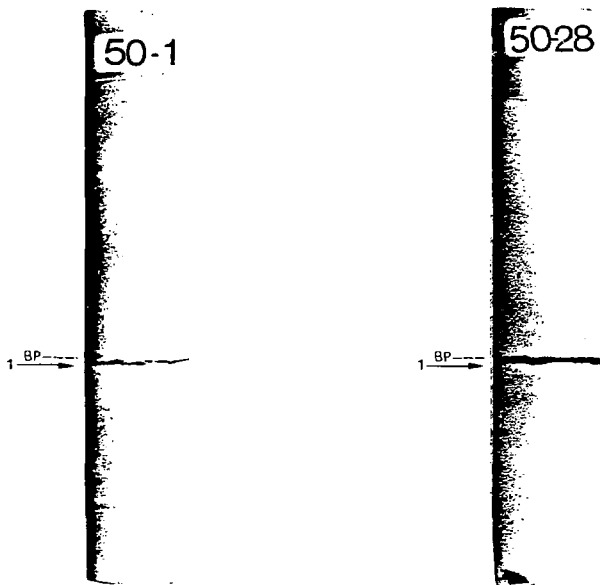
Figure 10 — Résultats des essais dans $MgCl_2$ en peau externe de maquettes dudgeonnées (sans DAM) et non martelées à la brosse (maquettes témoin).

BP----- : bord de plaque ; 1 → : position de l'angle avant du galet de dudgeonnage
 R_p : réduction de paroi lors du dudgeonnage.



a) $R_p \approx 3,5 \%$, martelage avec une intensité de 4 N.

b) $R_p \approx 4,7 \%$, martelage avec une intensité de 4 N.



c) $R_p \approx 3,4 \%$, martelage avec une intensité de 6 N.

d) $R_p \approx 3,8 \%$, martelage avec une intensité de 6 N.

Figur: 11 - Résultats des essais dans $MgCl_2$ en eau externe de maquettes dudgéonnées (sans DAMI) et martelées à l'air de d'une brosse de type 1.

BP----- bord de plaque : 1 : : position de l'angle avant du galet de dudgéonnage

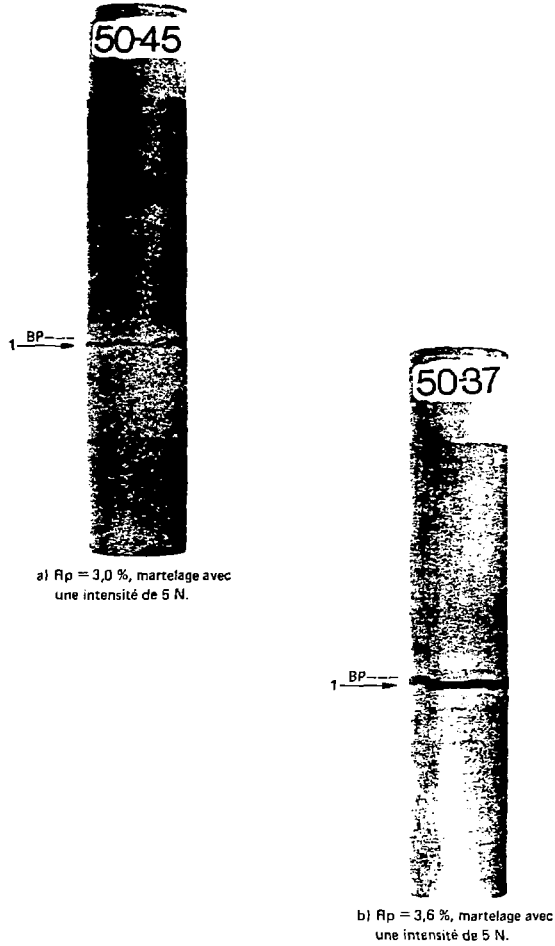


Figure 12 — Résultats des essais dans $MgCl_2$ en peau externe de maquettes dudgeonnées (sans DAM) et martelées à l'aide d'une brosse de type 2.

BP-----: bord de plaque ; 1 — : position de l'angle avant du dudgeonage
 R_p : réduction de paroi lors du dudgeonage.

Après le même essai, les résultats pour les maquettes soumises au martelage à l'aide des brosses sont les suivants :

- Deux des quatre maquettes martelées à l'aide d'une brosse du type 1 ne présentent aucune fissuration (figures 11a et b) alors que les deux autres présentent une fissure circonférencielle identique à celle observée sur les maquettes témoins (figures 11c et d).

- Les deux maquettes martelées à l'aide d'une brosse du type 2 présentent également une fissure circonférencielle identique à celle observée sur les maquettes témoins (figures 12 a et b).

L'absence de fissuration en peau externe pour deux des maquettes martelées n'a pas été expliquée à ce jour ; il est possible que certaines conditions de martelage produisent une légère déformation diamétrale du tube et entraînent une réduction des contraintes en peau externe par un effet similaire à celui observé pour le détensionnement par outils à galets tournants (cf. [3] et § 4).

En tout état de cause, le martelage à l'aide d'une brosse de la peau interne de tubes dudgeonnés, dans des conditions conduisant à une réduction des contraintes résiduelles de tension de cette peau interne, n'entraîne aucune modification défavorable des contraintes résiduelles de tension en peau externe.

4 - RESULTATS DES ESSAIS SUR MAQUETTES DUDGEONNEES ET DETENSIONNEES EN PEAU EXTERNE PAR OUTIL A GALETS TOURNANTS (DAM)

4.1. - Résultats des essais en peau interne (tableau IV)

Après essai dans le chlorure de magnésium, les deux maquettes témoins non soumises au martelage à l'aide de la brosse présentent en peau interne la fissuration habituellement observée dans la zone de transition de dudgeonnage, dans la zone de détensionnement et entre ces deux zones (figure 13, [3]).

Huit maquettes ont été soumises au martelage à l'aide des brosses. Les résultats obtenus sont les suivants :

- Deux maquettes martelées à l'aide d'une brosse du type 1 ne présentent plus aucune fissuration (figures 14b et c).

- Quatre autres présentent une légère fissuration (figures 14a et c, 15b et c).

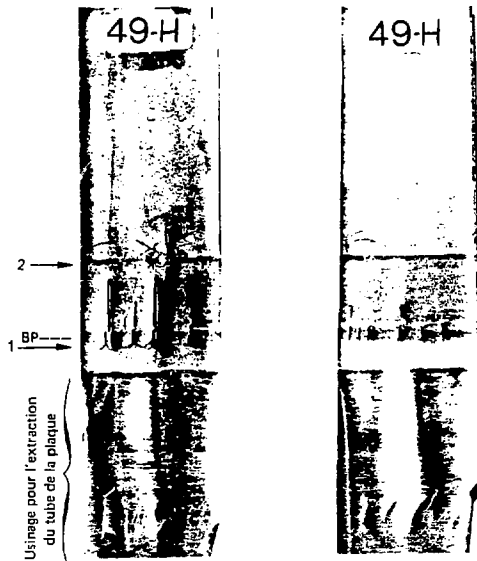
- Les deux dernières présentent une fissuration identique à celle observée sur les maquettes témoins (figures 14e et 15a).

TABLEAU IV – RÉSULTATS DES ESSAIS DANS Mg Cl₂ EN PEAU INTERNE DE MAQUETTES DUDGEONNÉES ET DÉTENSIONNÉES EN PEAU EXTERNE PAR OUTIL A GALETS TOURNANTS, MARTELÉES OU NON.

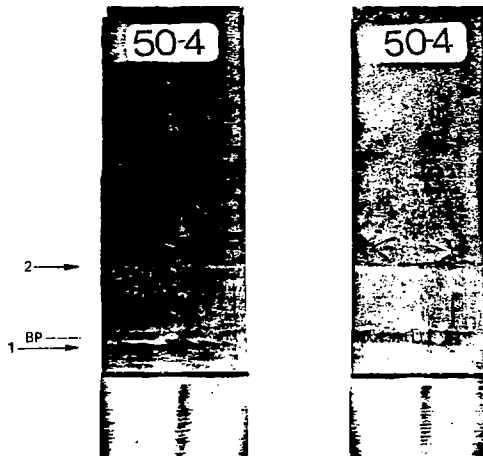
Repère de la maquette	Réduction de paroi lors du dudgeonnage (%)	'ariation de diamètre lors du détensionnement ($\Delta\phi$ en mm)	Martelage à la brosse				Résultats des essais Mg Cl ₂
			Type de brosse*	Vitesse de rotation (tour/min)	Temps de martelage (s)	Intensité ALMEN	
49-H (figure 13a)	3,2	0,15	Maquettes non soumises au martelage à la brosse (témoins de peau interne)				Fissuration dans les zones de transition de dudgeonnage et de détensionnement. Fissuration longitudinale entre ces 2 zones.
50-4 (figure 13b)	3,2	0,14					
50-34 (figure 14a)	3,5	0,15	1**	11500	290	4N	Fissuration dans la zone de transition de dudgeonnage.
50-13 (figure 14b)	4,1	0,14	1	11500	470	4N	Pas de fissuration
50-40 (figure 14c)	3,5	0,14	1**	12500	290	6N	Légère fissuration dans les zones de transition de dudgeonnage et de détensionnement.
50-3 (figure 14d)	3,8	0,14	1	12500	290	6N	Pas de fissuration
50-30 (figure 14e)	3,8	0,15	1**	12500	290	6N	Fissuration dans les zones de transition de dudgeonnage et de détensionnement. Fissuration longitudinale entre ces 2 zones.
50-36 (figure 15a)	3,6	0,15	2	11500	290	4N	Fissuration dans les zones de transition de dudgeonnage et de détensionnement. Fissuration longitudinale entre ces 2 zones.
50-41 (figure 15b)	4	0,15	2	11500	290	4N	Très légère fissuration dans la zone de transition de dudgeonnage.
50-42 (figure 15c)	3,5	0,14	2	12500	290	6N	Très légère fissuration dans la zone de transition de dudgeonnage.

*cf. § 2.3.2

**brosse détériorée à l'issue du martelage (perte des billes).



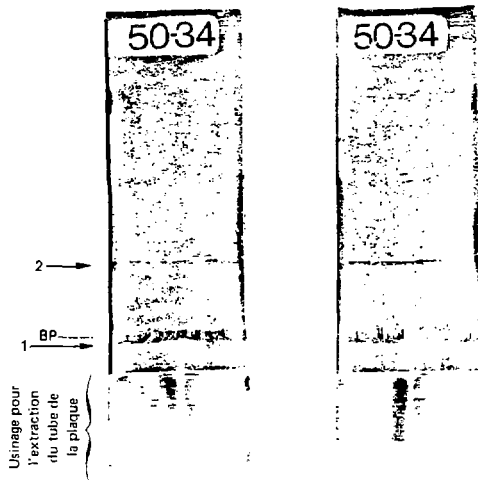
a) $R_p = 3,2 \%$, $\Delta\emptyset = 0,15 \text{ mm}$



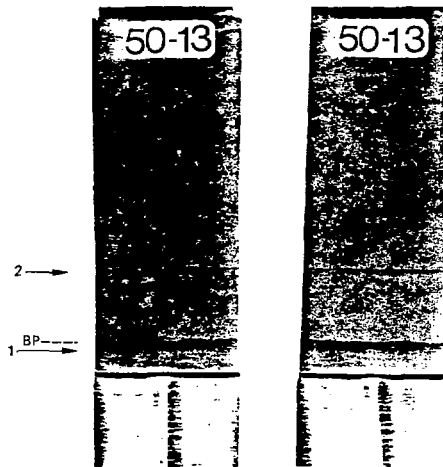
b) $R_p = 3,2 \%$, $\Delta\emptyset = 0,14 \text{ mm}$

Figure 13 – Résultats des essais dans MgCl_2 en peau interne de maquettes dudgeonnées, détensionnées en peau externe par outil à galets tournants (DAM) et non martelées à la brosse (maquettes témoins).

- BP----- : bord de plaque ; 1 — : position de l'angle avant du galet de dudgeonnage
 2 — : position de l'angle A du galet de détensionnement (cf. figure 2)
 R_p : réduction de paroi lors du dudgeonnage
 $\Delta\emptyset$: variation de diamètre lors du détensionnement.



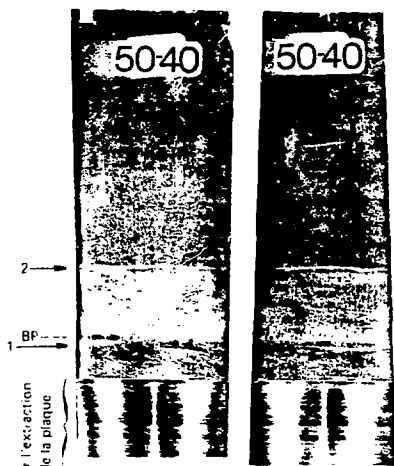
a) $R_p = 3,5\%$, $\Delta\phi = 0,15\text{ mm}$,
martelage avec une intensité de 4 N
(brosse détériorée en fin de martelage).



b) $R_p = 4,1\%$, $\Delta\phi = 0,14\text{ mm}$,
martelage avec une intensité de 4 N.

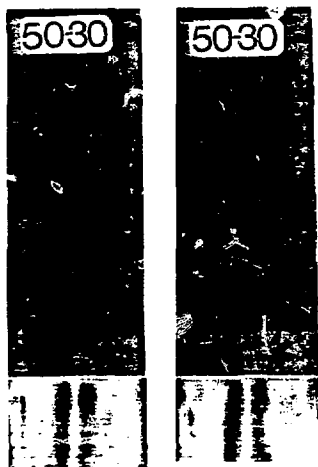
Figure 14 – Résultats des essais dans $MgCl_2$ en peau interne de maquettes dudgeonnées, détensionnées en peau externe par outil à galets tournants (DAM) et martelées à l'aide d'une brosse du type 1.

- BP → : bord de plaque ; 1 → : position de l'angle avant du galet de dudgeonnage
 2 → : position de l'angle A du galet de détensionnement (cf. figure 2)
 R_p : réduction de paroi lors du dudgeonnage
 $\Delta\phi$: variation de diamètre lors du détensionnement.

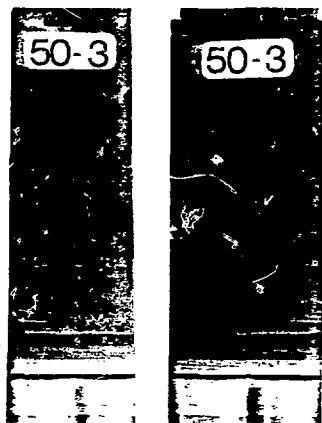


c) $R_p = 3,5 \%$, $\Delta\phi = 0,14$ mm,
martelage avec une intensité de 6 N
(brosse détériorée en fin de martelage).

Usinage pour l'extraction
du tube de la plaque



e) $R_p = 3,8 \%$, $\Delta\phi = 0,15$ mm,
martelage avec une intensité de 6 N
(brosse détériorée en fin de martelage).



d) $R_p = 3,8 \%$, $\Delta\phi = 0,14$ mm,
martelage avec une intensité de 6 N.

Figure 14 (suite) — Résultats des essais dans $MgCl_2$ en peau interne de maquettes dudgeonnées, détensionnées en peau externe par outil à galets tournants (DAM) et martelées à l'aide d'une brosse du type 1.
BP----- : bord de plaque, 1 → : position de l'angle avant du galet de dudgeonnage
2 → : position de l'angle A du galet de détensionnement (cf. figure 2)
 R_p : réduction de paroi lors du dudgeonnage
 $\Delta\phi$: variation de diamètre lors du détensionnement

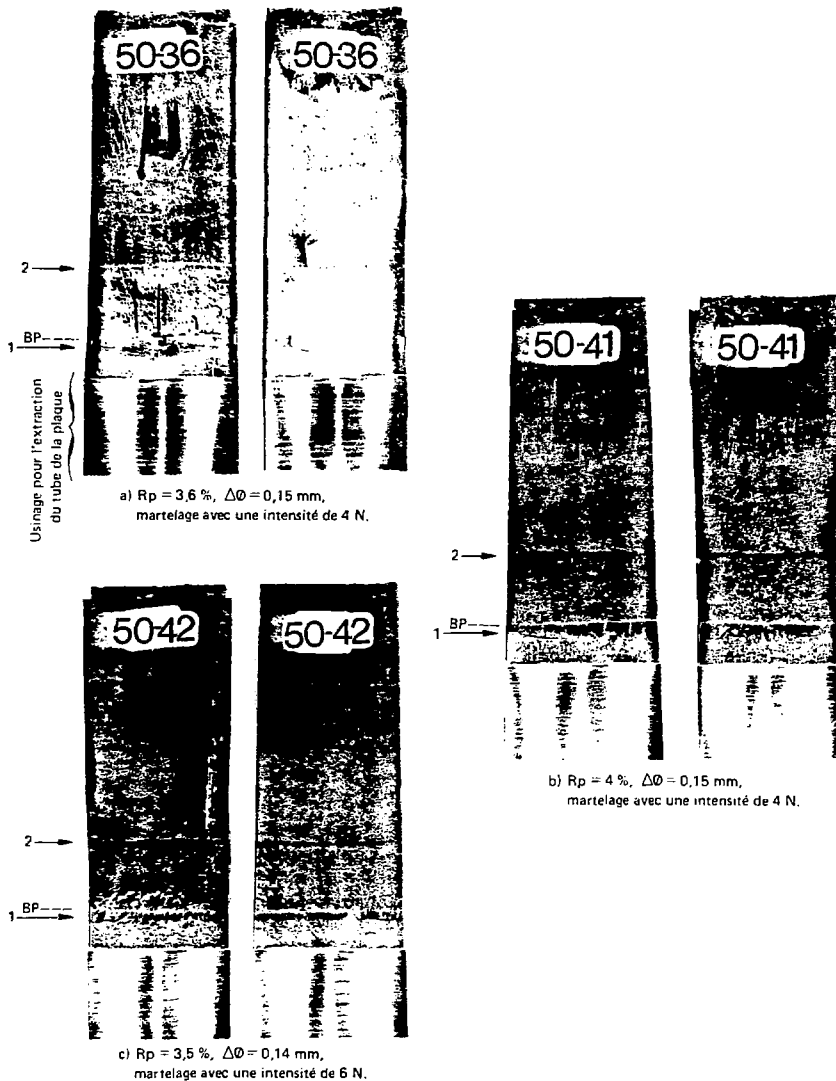


Figure 15 – Résultats des essais dans $MgCl_2$ en peau interne de maquettes dudgeonnées, détensionnées en peau externe par outil à galets tournants (DAM) et martelées à l'aide d'une brosse du type 2
 BP----- : bord de plaque ; 1 → : position de l'angle avant du galet de durgeonnage
 2 --- : position de l'angle A du galet de détensionnement (cf. figure 2)
 Rp : réduction de paroi lors du dudgeonnage

En ce qui concerne les six maquettes présentant encore des fissures, il faut noter que :

- trois d'entre elles ont été martelées à l'aide de brosses du type 1 qui ont été trouvées détériorées (perte de billes) à l'issue du martelage (figures 14a, c et e),
- les trois autres ont été martelées à l'aide de brosses du type 2 qui ont été trouvées repliées autour de leur axe en fin de martelage (figures 15a, b et c).

Lorsqu'il est effectué dans de bonnes conditions, le martelage peut donc permettre de réduire notablement le niveau des contraintes résiduelles de tension en peau interne des tubes.

4.2. - Résultats des essais en peau externe (tableau V)

Après essai dans le chlorure de magnésium, les quatre maquettes témoins non soumises au martelage à l'aide de la brosse présentent en peau externe la fissuration circonférencielle au niveau du contact de l'angle avant du galet de détensionnement déjà signalée en cas d'emploi de galets à profil non adouci (figure 16, [3]). L'une des maquettes présente en outre des petites fissures circonférencielles au dernier contact tube-plaque (figure 16c).

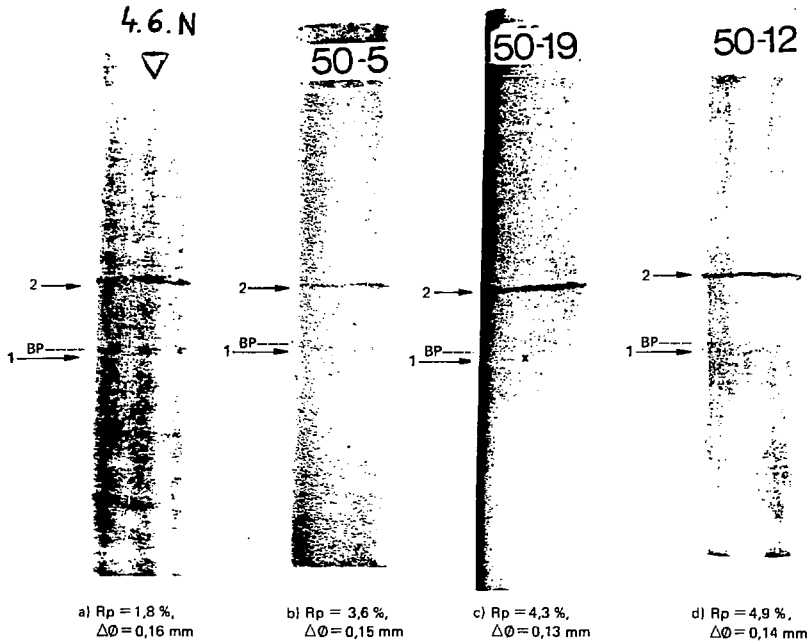
Après le même essai, les résultats pour les maquettes soumises au martelage à l'aide des brosses sont les suivants :

- Les trois maquettes martelées à l'aide d'une brosse du type 1 présentent la fissure circonférencielle observée sur les maquettes témoins (figures 17a, b et c). Deux d'entre elles présentent en outre une fissure longitudinale de quelques millimètres au-dessus de cette fissure circonférencielle (figures 17a et b).
- Les deux maquettes martelées à l'aide d'une brosse du type 2 présentent également la fissure circonférencielle observée sur les maquettes témoins (figures 18a et b). Elles présentent en outre des petites fissures circonférencielles au dernier contact tube-plaque semblables à celles observées sur une maquette témoin (figure 16c) et on observe sur l'une d'elles des fissures longitudinales identiques à celles déjà décrites (figure 18a).

TABEAU V — RÉSULTATS DES ESSAIS DANS Mg Cl₂ EN PEAU EXTERNE DE MAQUETTES DUDGEONNÉES ET DÉTENSIONNÉES EN PEAU EXTERNE PAR OUTIL A GALETS TOURNANTS, MARTELEES OU NON.

Repère de la maquette	Réduction de paroi lors du dudgeonnage (%)	Variation de diamètre lors du détensionnement (ΔØ en mm)	Martelage à la brosse				Résultats des essais Mg Cl ₂
			Type de brosse*	Vitesse de rotation (tour/min)	Temps de martelage (s)	Intensité ALMEN	
46-N (figure 16a)	1,8	0,16	Maquettes non soumises au martelage à la brosse (témoins de peau externe)				Fissure circonférentielle au niveau du contact de l'angle avant du galet de détensionnement. (Petites fissures circonférentielles au dernier contact tube-plaque pour la maquette 50-19).
50-5 (figure 16b)	3,6	0,15					
50-19 (figure 16c)	4,3	0,13					
50-12 (figure 16d)	4,9	0,14					
50-14 (figure 17a)	4,9	0,14	1	11500	470	4N	Fissure circonférentielle au niveau du contact de l'angle avant du galet de détensionnement. Fissure longitudinale (8 mm) au dessus de cette fissure circonférentielle.
50-6 (figure 17b)	3,8	0,15	1	12500	290	6N	Fissure circonférentielle au niveau du contact de l'angle avant du galet de détensionnement. Fissure longitudinale (9 mm) au dessus de cette fissure circonférentielle.
50-20 (figure 17c)	4,1	0,13	1	12500	290	6N	Fissure circonférentielle au niveau du contact de l'angle avant du galet de détensionnement.
50-43 (figure 18a)	3,0	0,15	2	11500	290	4N	Fissure circonférentielle au niveau du contact de l'angle avant du galet de détensionnement. Petites fissures longitudinales (4 à 5 mm) au-dessus de cette fissure circonférentielle. Petites fissures circonférentielles au dernier contact tube-plaque.
50-35 (figure 18b)	4,5	0,15	2	11500	290	4N	Fissure circonférentielle au niveau du contact de l'angle avant du galet de détensionnement. Petites fissures circonférentielles au dernier contact tube-plaque.

*cf. § 2.3.2



La croix indique la position de petites fissures circonférentielles au dernier contact tube-plaque

Figure 16 - Résultats des essais dans $MgCl_2$ en peau externe de maquettes dudgeonnées, détensionnées en peau externe par outil à galets tournants (DAM) et non martelées à la brosse (maquettes témoins).
BP----- : bord de plaque 1 → : position de l'angle avant du galet de dudgeonnage
2 → : position de l'angle A du galet de détensionnement (figure 2)
 R_p : réduction de parois du dudgeonnage
 $\Delta\phi$: variation de diamètre lors du détensionnement.

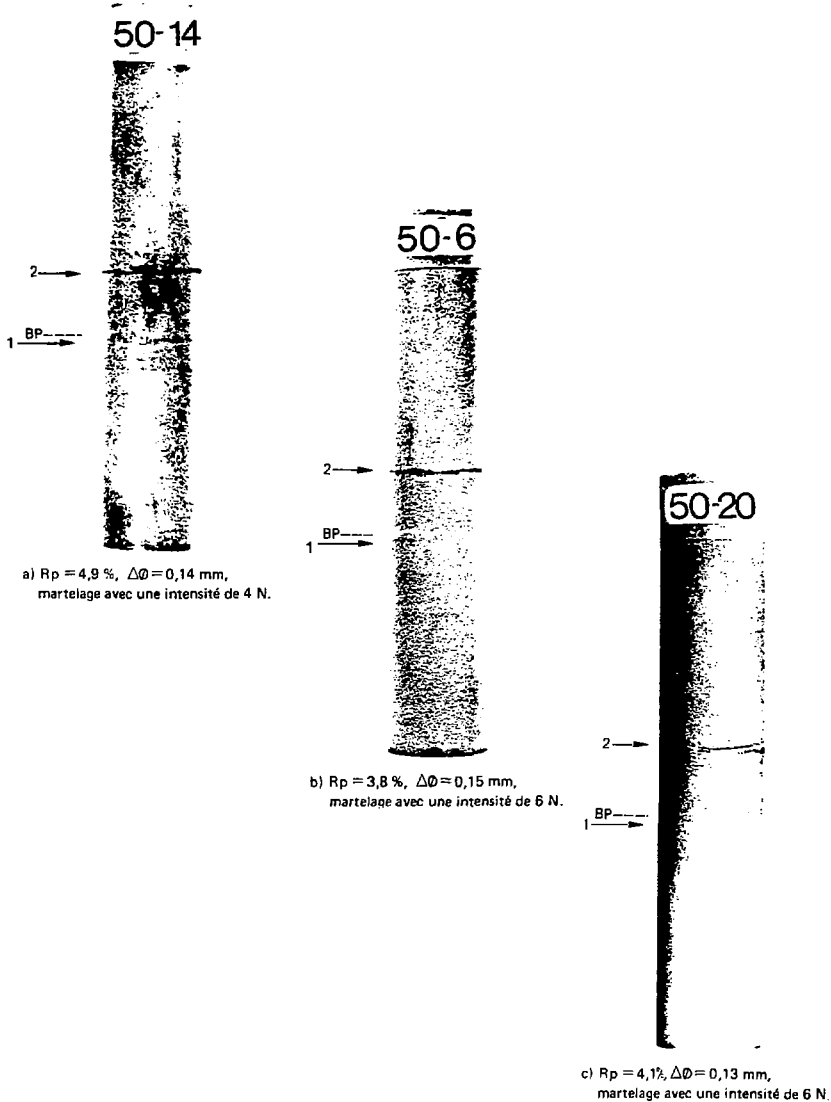


Figure 17 - Résultats des essais dans $MgCl_2$ en peau externe de maquettes dudgeonnées, détensionnées en peau externe par outil à galets tournants (DAM) et martelées à l'aide d'une brosse du type 1.

BP----- : bord de plaque ; 1 → : position de l'angle avant du galet de dudgeonnage

2 → : position de l'angle A du galet de détensionnement (cf. figure 2)

R_p : réduction de paroi lors du dudgeonnage

$\Delta\varnothing$: variation de diamètre lors du détensionnement.

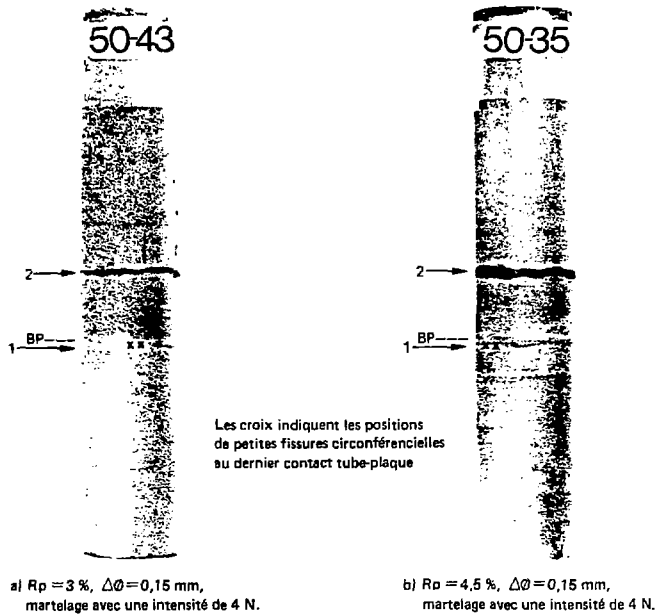


Figure 18 -- Résultats des essais dans $MgCl_2$ en peau externe de maquettes dudgeonnées, détensionnées en peau externe par outil à galets tournants (DAM) et martelées à l'aide d'une brosse du type 2.

- BP----- : bord de plaque ; 1 → : position de l'angle avant du galet de dudgeonnage
2 → : position de l'angle A du galet de détensionnement (cf. figure 2)
 R_p : réduction de paroi lors du dudgeonnage
 $\Delta\varnothing$: variation de diamètre lors du détensionnement.

A l'examen de ces résultats, il ressort donc que le martelage à l'aide d'une brosse de la peau interne de tubes judgés et détensionnés par outil à galets tournants (DAM), dans des conditions conduisant à une réduction des contraintes résiduelles de tension de cette peau interne, ne modifie pas notablement les contraintes résiduelles longitudinales en peau externe. Par contre, la présence de petites fissures longitudinales sur trois des maquettes martelées peut laisser supposer que le martelage en peau interne tend à produire une augmentation des contraintes résiduelles circonférencielles en peau externe. De manière à examiner ce point, des mesures de contraintes résiduelles ont été entreprises en peau externe de tubes simplement martelés.

5 - MESURE DES CONTRAINTES RESIDUELLES INDUITES EN PEAU EXTERNE D'UN TUBE PAR LE MARTELAGE A LA BROSSSE EN PEAU INTERNE

Deux tronçons de tube non judgés, ayant subi préalablement un traitement thermique de détensionnement de 20 min à 880°C, ont été soumis en peau interne à un martelage à l'aide d'une brosse du type 1 (dans des conditions conduisant à une intensité Almen de 6 N) sur environ 40 mm de longueur.

L'un des tronçons a été soumis après martelage à un essai dans le chlorure de magnésium bouillant en peau externe dans les conditions définies au § 2.4. Aucune fissuration n'a été mise en évidence par cet essai, ce qui implique que le martelage n'a pas introduit en peau externe du tube de contraintes résiduelles de tension supérieures à environ 100 - 150 MPa (contrainte minimale de fissuration lors de l'essai pratiqué).

Sur le second tronçon, on a effectué des mesures de contraintes résiduelles par diffraction des rayons X* en peau externe selon la méthode suivante :

- mesure le long de 2 génératrices,
- sur chaque génératrice, 2 points de mesure dans la zone martelée et 2 en dehors, soit au total 4 points de mesure par zone.

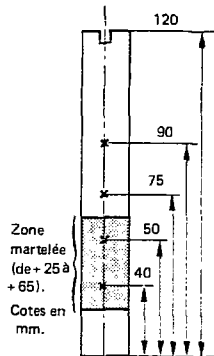
* Les conditions d'essai étaient les suivantes :

- Rayonnement $K\alpha_1$ du manganèse,
- Plan (311),
- Détecteur à localisation linéaire,
- Plage illuminée : 2 x 2 mm² environ.

Les résultats (tableau VI) * montrent qu'il n'y a pas de différence notable de contraintes résiduelles en peau externe entre la zone martelée à l'aide de la brosse et le reste du tube. Tout au plus peut-on noter une augmentation des valeurs des contraintes résiduelles en peau externe dans la zone martelée de 20 à 40 Mpa, ce qui est l'ordre de grandeur de la précision des mesures.

TABLEAU VI - RÉSULTATS DES MESURES DE CONTRAINTES RÉSIDUELLES PAR RAYONS X EN PEAU EXTERNE D'UN TUBE MARTELÉ LOCALEMENT A LA BROSSSE EN PEAU INTERNE.

	Cote des points de mesure (voir ci-contre)	Contrainte longitudinale σ_{zz} (MPa)		Contrainte circonférentielle $\sigma_{\theta\theta}$ (MPa)	
		Valeurs individuelles	Valeur moyenne	Valeurs individuelles	Valeur moyenne
Zone non martelée à la brosse	90	-37, +53	+ 10	-47, + 18	- 22
	75	+ 4, + 22		-63, + 3	
Zone martelée à la brosse	50	-18, +53	+ 28	+ 2, +27	+ 17
	40	+19,+59		+ 9, +32	



Le martelage de la peau interne d'un tube ne modifie donc pas notablement le niveau des contraintes résiduelles en peau externe. Les fissures longitudinales observées en peau externe sur certaines maquettes dudgeonnées par outil à galets tournants et soumises au martelage à l'aide d'une brosse sont donc, au pire, la conséquence d'une augmentation des contraintes de 20 à 40 MPa sur des tubes dont la peau externe présentait déjà un niveau de contraintes résiduelles proche du seuil de fissuration dans le chlorure de magnésium (100 - 150 MPa).

* La précision des mesures de contraintes résiduelles par diffraction des rayons X a été estimée à environ ± 20 MPa.

6 - CONCLUSION

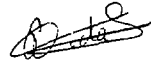
Un procédé visant à empêcher la fissuration par corrosion sous tension côté primaire des zones dudgeonnées des tubes de générateurs de vapeur de centrales à eau pressurisée a été étudié. Ce procédé consiste à marteler dans ces zones la peau interne des tubes à l'aide d'une "brosse tournante" constituée d'un support textile sur lequel sont collées des billes de verre de grenailage.

Des essais de martelage utilisant ce dispositif ont été effectués en peau interne de tubes dudgeonnés ayant ou non subi un détensionnement de la peau externe par outil à galets tournants (DAM).

Ces essais ont montré que le procédé étudié permet, lorsqu'il est appliqué dans de bonnes conditions, d'obtenir une réduction notable des tensions résiduelles de dudgeonnage en peau interne des assemblages jusqu'à des valeurs inférieures à environ 100 à 150 MPa, sans modifier défavorablement les contraintes résiduelles en peau externe. De ce fait, pour les tubes de générateurs de vapeur sur lesquels le phénomène de corrosion ne s'est pas encore manifesté, le risque de fissuration devrait pouvoir être supprimé par l'application du procédé.

L'étude se poursuit par des essais entrepris afin d'examiner quelles conséquences aurait l'application du procédé à des tubes sur lesquels le phénomène de corrosion aurait déjà débuté. Des essais sont également en cours, en collaboration avec le laboratoire Matières Plastiques des Arts et Métiers, pour optimiser l'opération de collage des billes sur le support textile.

L'Ingénieur chargé,



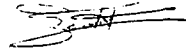
P. VIDAL.

Vu, Le Chef de la Division Essais Physiques,



G. ZACHARIE.

Le Chef de la Section Soudage et Traitements Thermiques,



R. BOUDOT.

DOCUMENTS CITES EN REFERENCE

-:-:-

- [1] Document du Groupe des Laboratoires (SCMI) D.5004/PHN/R.83.112 du 13 octobre 1983 : Centre de production nucléaire du Bugey. Sous unité centrale 2-3. Tranche 3. Examen de 2 tubes du générateur de vapeur n° 2.
- [2] Document du Groupe des Laboratoires (SCMI) D.5152/82.87 du 16 septembre 1982 : GRPT Sud-Est. Centrale de Bugey. Tranche 5. Examen de 3 tubes du générateur de vapeur de la boucle 2. Rapport d'expertise.
- [3] Procès-verbal EMA n° D 463 MAT/T 44 du 20 mars 1980 : Abaissement du niveau des contraintes de tension résiduelles dans les tubes de générateurs de vapeur de réacteurs à eau pressurisée. 1ème partie : cas des zones de transition des soudages.