

INFLUENCE DE L'ETAT DE SURFACE SUR LA RESISTANCE A LA FATIGUE D'UN ACIER A 13% DE CHROME POUR AILETAGES DE TURBINES A VAPEUR

J. R. Donati, J. Grattier, S. H. Masson et F. Ternon

*EdF, Département Etude des Matériaux, Centre des Renardières,
77250 Moret-sur-Loing, France*

RESUME

La tenue à la fatigue et à la fatigue-corrosion des aciers à 13 % de chrome utilisés pour les ailetages mobiles de turbines à vapeur des centrales thermiques conventionnelles ou nucléaires est un paramètre important de la fiabilité de ces équipements. Ces propriétés apparaissent reliées, entre autres facteurs, à l'état de surface final des produits.

Dans le cadre d'une étude générale entreprise en commun avec un turbinier, des essais de fatigue et de fatigue-corrosion ont été effectués sur un produit forgé de la nuance Z 19 CD 12-1, les éprouvettes utilisées présentant divers types d'états de surface rencontrés pratiquement sur les ailettes : meulages sens travers ou sens long avec différentes rugosités, traitement "au tonneau", grenailage de nettoyage et de précontrainte à la bille d'acier.

Les limites d'endurances ont été déterminées à partir de la méthode de l'escalier de Dixon et Mood, en flexion rotative et en traction alternée ou répétée (à 10^7 cycles dans l'air et 3.10^7 cycles dans l'eau chlorurée à 1 g/l de NaCl).

Les résultats obtenus sont interprétés à partir de mesures par diffraction des rayons X des contraintes résiduelles superficielles résultant des différents traitements de surface étudiés, mettant ainsi en évidence les rôles respectifs de ces contraintes résiduelles et de la rugosité géométrique sur la résistance à la fatigue.

MOTS CLES

Grenailage de précontrainte ; traitement de surface ; fatigue ; fatigue-corrosion ; contraintes résiduelles ; rugosité ; diffraction R.X.

INTRODUCTION

Les ailetages mobiles des turbines à vapeur des centrales thermiques conventionnelles et nucléaires sont réalisés en aciers martensitiques à 13 % de chrome. Les dernières rangées des étages basse pression sont équipées d'ailettes matricées de grandes dimensions qui doivent supporter des sollicitations cycliques élevées. Les

ruptures ou fissurations par fatigue de ces ailetages étant à l'origine d'un certain nombre d'avaries des groupes turboalternateurs, une étude a été entreprise avec un turbiniériste pour évaluer l'influence de l'état de surface sur la tenue à la fatigue dans l'air et l'eau chlorurée d'un acier Z 19 CD 12-1 constituant les ailetages de certains groupes 900 MW des centrales nucléaires à eau pressurisée. On propose ici une interprétation des résultats de ces essais à partir de la mesure des contraintes résiduelles superficielles associées aux différents états de surface étudiés.

MATERIAU

Le matériau utilisé pour les essais a été approvisionné sous la forme de barres forgées \varnothing 20 mm (composition chimique : C = 0,20 % ; Si = 0,35 % ; Mn = 0,49 % ; S = 0,008 % ; P = 0,022 % ; Cr = 12,10 % ; Mo = 0,81 % ; Ni = 0,56 % ; V = 0,037 %). Le traitement thermique de qualité subi par ces barres est le suivant : maintien 30 min à 1 050°C, trempe air ; revenu 2 h à 680°C, refroidissement air ; détente 2 h à 650°C, refroidissement air. Les caractéristiques de traction à 20°C correspondantes sont : $R_{0,2\%}$ = 685 MPa, R_m = 873 MPa, A = 16 %, Z = 48 %.

ETATS DE SURFACE ETUDIES

Les états de surface étudiés, dont les caractéristiques sont données au tableau I, sont pour la plupart représentatifs de traitements industriels pratiqués sur ailettes (polissage, meulages à la bande, traitement "au tonneau"^{*}, grenailage de nettoyage et de précontrainte). Ils correspondent à différentes valeurs de la profondeur totale de rugosité Rt.

CONDITIONS D'ESSAIS

Les essais de fatigue ont été conduits à température ambiante sur les états de surface n° 1 à 6 en flexion rotative (éprouvettes cylindriques \varnothing 7,52 mm, fréquence 50 Hz) et sur les états n° 3 et 7 en traction alternée ou répétée (éprouvettes toriques \varnothing 5,64 mm, fréquence 180 Hz) jusqu'à 10^7 cycles dans l'air et 3.10^7 cycles dans l'eau aérée chlorurée (1 g/l NaCl, pH = 5 à 6). Les limites d'endurance ont été déterminées par la méthode de l'escalier. Les essais ont été conduits dans 2 laboratoires repérés 1 et 2.

La détermination des contraintes résiduelles superficielles longitudinales sur les éprouvettes de fatigue a été effectuée par diffraction des rayons X dans les conditions suivantes : rayonnement $K\alpha_1$ du chrome, famille de plans [211], angle de Bragg $\theta \sim 77^\circ$, analyse du rayonnement diffracté par détecteur à localisation linéaire.

RESULTATS

Essais de Fatigue

En flexion rotative, les limites d'endurance pour les états de surface n° 1 à 6 se situent toutes (tableau II et figure 1) entre 407 et 450 MPa dans l'air et entre 102 et 150 MPa dans l'eau chlorurée. Dans un milieu donné, ces écarts sont très faibles en regard des caractéristiques géométriques (en particulier rugosité) très différentes de ces états de surface. Par contre, l'influence de l'eau chlorurée sur la limite d'endurance est très importante quel que soit l'état de surface.

* Ce traitement consiste en un brassage des ailettes en présence de tétraèdres en matière plastique dure.

**TABLEAU I – CORRESPONDANCE ENTRE LES TRAITEMENTS DE SURFACE PRATIQUES
SUR AILETTES ET LES ÉTATS DE SURFACE ÉTUDIÉS EN FATIGUE.**

Traitements industriels pratiqués sur ailettes			États de surface étudiés en fatigue		
Conditions	But	Rugosité obtenue	N°	Définition	Rugosité R_t (μm)**
			1	Poli « diagonal » (État de référence)	1 - 2
Meulage à la bande abrasive sans orientation préférentielle.	Élimination des défauts superficiels	$R_t \text{ maxi} \approx 25 \mu\text{m}$ $R_t \text{ moy} \approx 12 \mu\text{m}$	2	Meulé sens long*	10-15
			3	Meulé sens travers*	20-35
			4	Meulé sens travers*	10-15
Meulage + grenailage à la bille d'acier. Intensité Almen = 5 A ₂	Nettoyage de finition	$R_t \text{ maxi} \leq 25 \mu\text{m}$ $R_t \text{ moy} \leq 12 \mu\text{m}$	5	3 + grenailage de nettoyage	20-35
Meulage + traitement « au tonneau »	Traitement final		6	3 + traitement « au tonneau » (conditions du traitement industriel).	10-20
Meulage + grenailage de précontrainte à la bille d'acier ϕ 0,5 - 0,6 mm Intensité Almen = 10-16 A Taux de recouvrement > 100%	Traitement final d'uniformisation de l'état de surface : – durcissement – contraintes résiduelles de compression.		7	3 + Grenailage de précontrainte à la bille d'acier ϕ 0,5 – 0,6 mm Intensité Almen = 12-14 A Taux de recouvrement 200%	20-35

* Sens long = sens de l'effort appliqué ; sens travers = perpendiculaire à l'effort appliqué

** Profondeur maximale de rugosité (mesurée perpendiculairement aux stries dans le cas du meulage).

En traction alternée, dans l'air, le grenailage de précontrainte (état de surface n° 7) appliqué sur une surface meulée sens travers (état de surface n° 3) apporte une augmentation d'environ 20 % (de 407 à 481 MPa) de la limite d'endurance. La différence entre les états 3 et 7, bien que significative, n'est pas aussi importante que ce qui aurait pu être attendu d'un grenailage de précontrainte.

En traction répétée, on constate que la contrainte maximale supportable pendant les cyclages dans l'air est de l'ordre de la limite d'élasticité du matériau ($R_{0,2} \approx 685$ MPa). Elle est donc vraisemblablement écartée à ce niveau par des effets de relaxation.

Les résultats obtenus dans l'eau montrent, sur le même état de surface, un très faible effet de contrainte moyenne, au moins jusqu'à 200 MPa, vraisemblablement dû à la faible résistance à la fatigue en eau chlorurée du matériau étudié.

La présentation sur un diagramme de Goodmann des résultats obtenus sur l'état de surface n° 7 meulé + grenailé est donnée sur la figure 2.

TABLEAU II – RÉSULTATS DES ESSAIS DE FATIGUE EFFECTUÉS SUR L'ACIER Z19 CD 12-1 :
LIMITES D'ENDURANCE POUR LES DIFFÉRENTS ÉTATS DE SURFACE ÉTUDIÉS.

État de surface			Essais de fatigue				
N°	Définition	Rugosité R _t (μm)	Sollicitation*	Laboratoire	Milieu	Limite d'endurance (MPa)	Écart-type (MPa)
1	Poli « diagonal »	1 - 2	F. R. R = -1	1	air	450	10
					eau + 1 g/l NaCl	108	4
2	Meulé sens long	10 - 15		1	air	423	8
1				air	407	5	
3	Meulé sens travers	20 - 35		2	eau + 1 g/l NaCl	141	27
4				Meulé sens travers	10 - 15	1	air
5	3 + grenailage de nettoyage (l = 5 A ₂)	20 - 35				1	air
				eau + 1 g/l NaCl	102		8
6	3 + traitement « au tonneau »	10 - 20		1	air	413	16
					2	eau + 1 g/l NaCl	130
3	Meulé sens travers	20 - 35	T.C.: R = -1	2	air	407	14
7	3+ $\left\{ \begin{array}{l} \text{grenailage de} \\ \text{précontrainte} \\ l = 12 - 14 A \\ \varnothing = 0,5-0,6 \text{ mm} \\ \text{taux de recou-} \\ \text{vrement : 200 \%} \end{array} \right.$	20 - 35	T.C.: R = -1	2	air	481	9
					eau + 1 g/l NaCl	187	16
			T.R.: R = 0	2	air	340 ± 340	N.S.**
					eau + 1 g/l NaCl	184 ± 184	71

* F.R. : flexion rotative – T.C. : traction-compression – T.R. : traction répétée.

** N.S. : non significatif

Mesure des Contraintes Résiduelles Superficielles

Les contraintes longitudinales ont été mesurées avant et après essai de fatigue, ainsi qu'au cours de la durée de vie (interruption de l'essai) sur des éprouvettes présentant les états de surface n° 3, 6 et 7 (tableau III) :

. Avant essai de fatigue, tous les états de surface contrôlés présentent des contraintes résiduelles superficielles de compression quelles que soient leurs caractéristiques géométriques : en moyenne - 290 MPa, avec une assez grande dispersion, pour l'état de surface n° 3 (meulé sens travers), - 415 MPa pour l'état n° 6 (meulé + traitement "au tonneau"), - 420 MPa pour l'état n° 7 (meulé + grenailage 12 - 14 A).

. Après essai de fatigue, les contraintes résiduelles superficielles sont systématiquement plus faibles que celles relevées avant essai. Sous efforts alternés, la relaxation est, pour un état de surface donné, une fonction croissante de la valeur

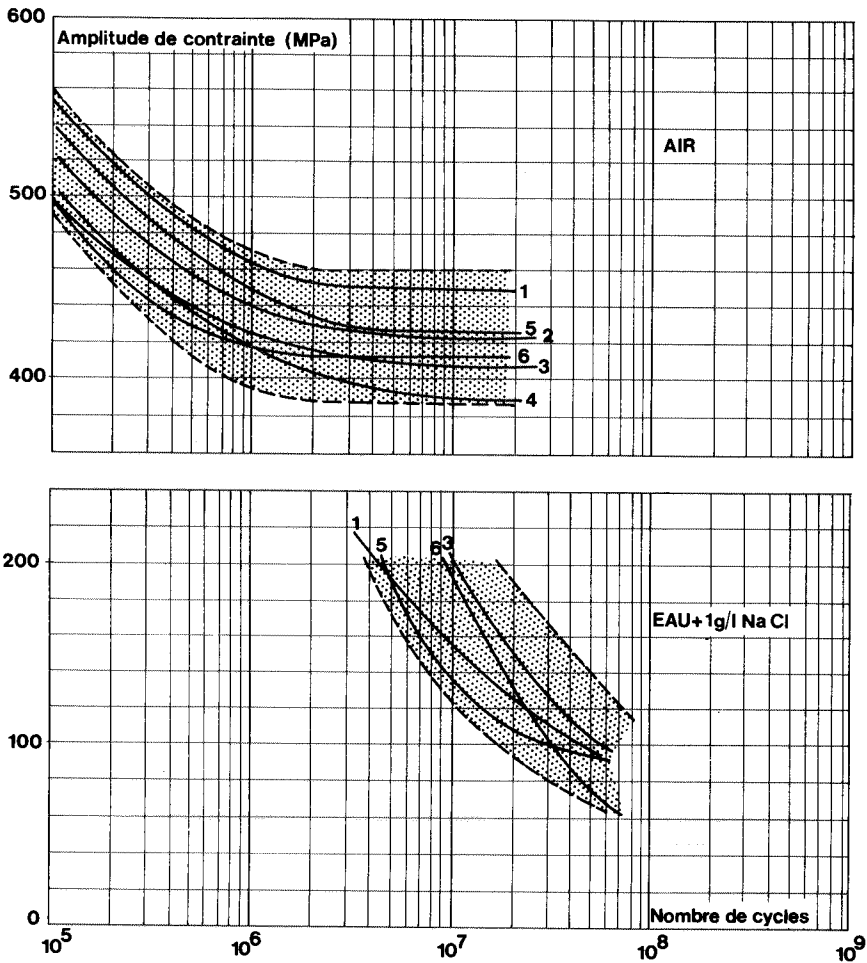


Figure 1— Courbes de Wöhler en flexion rotative : comparaison des différents états de surface dans l'air et en milieu eau+1g/l NaCl à 20°C.

initiale de la contrainte résiduelle et de la sollicitation de fatigue subie.

Les contraintes résiduelles montrent par ailleurs une relaxation du même ordre pour les états de surface n° 6 et 7 que pour l'état de surface n° 3, malgré des valeurs initiales plus élevées.

En traction répétée, une relaxation intervient également sous sollicitation élevée.

. Pendant la durée de vie, l'étude de l'évolution des contraintes résiduelles superficielles montre que quand il y a relaxation, la plus grande part de celle-ci intervient en début d'essai, la contrainte résiduelle restant ensuite quasiment stable (cf. figure 3 pour l'état de surface n° 7).

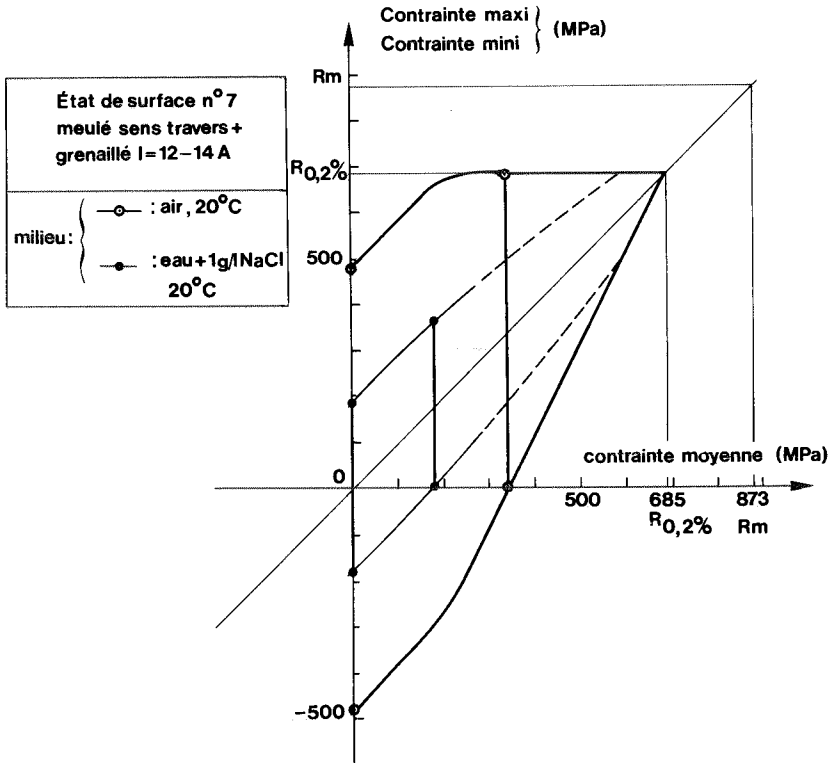


Figure 2—Diagramme de Goodman pour les essais en traction alternée et répétée sur l'état de surface n° 7

DISCUSSION

. Malgré des rugosités différentes, tous les états de surface étudiés présentent des contraintes résiduelles superficielles de compression longitudinales comprises entre - 273 et - 455 MPa (sauf pour l'état n° 2 meulé sens long).

Les états meulés ont certainement été obtenus dans des conditions douces sans échauffement local de la surface [1, 2] permettant d'obtenir des contraintes résiduelles de compression.

Le traitement "au tonneau" a produit, par effet de matage, une déformation plastique de traction en surface introduisant également des contraintes de compression qui viennent, dans le cas présent, se superposer à celles induites par l'opération de meulage.

Les traitements de grenailage ont également introduit, par effet de martelage [3], des contraintes résiduelles supplémentaires de compression dont les niveaux sont, au moins en extrême surface, aussi élevés après le grenailage de nettoyage d'intensité modérée (état n° 5, intensité = 5 A) qu'après le grenailage de précontrainte d'intensité plus forte (état n° 7, intensité = 12 - 14 A).

L'existence de contraintes de compression en surface pour tous ces états, y compris pour l'état meulé de départ, peut expliquer le fait qu'on n'ait pas constaté d'amélioration due au traitement "au tonneau" ou au grenailage de nettoyage lors des

TABLEAU III – CONTRAINTES RÉSIDUELLES SUPERFICIELLES ASSOCIÉES AUX DIFFÉRENTS ÉTATS DE SURFACE ÉTUDIÉS.

État de surface	Conditions d'essais				Repère génératrice sur éprouvette	Contrainte résiduelle longitudinale (MPa)		
	Sollicitation*	Milieu	Nombre de cycles	Contrainte (MPa)		Valeur initiale	Valeur après essai	Valeur relaxée
1	F.R.	air	$1,2 \cdot 10^7$	± 420	1,3		- 290	
		eau +1 g/l NaCl	$3 \cdot 10^7$	± 100	1,3		- 395	
2	F.R.	air	10^7	± 400	1,2 3,4		- 110 - 165	
3	F.R.	air	$1,2 \cdot 10^7$	± 400	1,3		- 275	
			$1,9 \cdot 10^7$	± 380	1 2, 3, 4	- 225 - 290	- 225 - 220	0 - 70
		eau +1 g/l NaCl	$2 \cdot 10^6$	± 180	1 3		- 315 - 355	
4	F.R.	air	10^7	± 380	1 3		- 270 - 305	
5	F.R.	air	10^7	± 400	1,3		- 370	
		eau +1 g/l NaCl	$3 \cdot 10^7$	± 100	1 2,3		- 385 - 485	
6	F.R.	air	10^7	± 420	1,3		- 310	
			$1,4 \cdot 10^7$	± 400	1, 2, 3, 4	- 415	- 325	- 90
		eau +1 g/l NaCl	10^6	± 180	1 3		- 440 - 385	
3	T.C.	air	10^7	± 380	1 2, 3, 4	- 150 - 290	- 155 - 230	0 - 60
7	T.C.	air	10^6	± 480	1 3	- 445 - 465	- 305 - 255	- 140 - 210
			$5 \cdot 10^6$	± 460	1, 3 2, 4	- 365 - 410	- 290 - 265	- 75 - 155
			10^7	± 180	1, 2, 3, 4	- 445	- 405	- 40
	T.R.	air	10^6	340 ± 340	1, 3	- 370 - 415	- 365 - 365	≈ 0 - 50
						- 440	- 385	- 55

* F.R. = Flexion rotative – T.C. = traction-compression – T.R. = traction répétée

essais de fatigue effectués et que même le grenailage de précontrainte n'apporte qu'un bénéfice réduit.

. L'absence d'effet des traitements de surface sur la limite d'endurance sous sollicitation alternée pourrait également être expliquée par une relaxation des contraintes résiduelles due à une plastification en compression lors du cyclage et aboutissant à un niveau faible pour tous les états. Les résultats obtenus (tableau III) montrent qu'une certaine relaxation peut exister mais que même sous forte contrainte alternée, cette relaxation est loin d'être complète. Un modèle permettant de

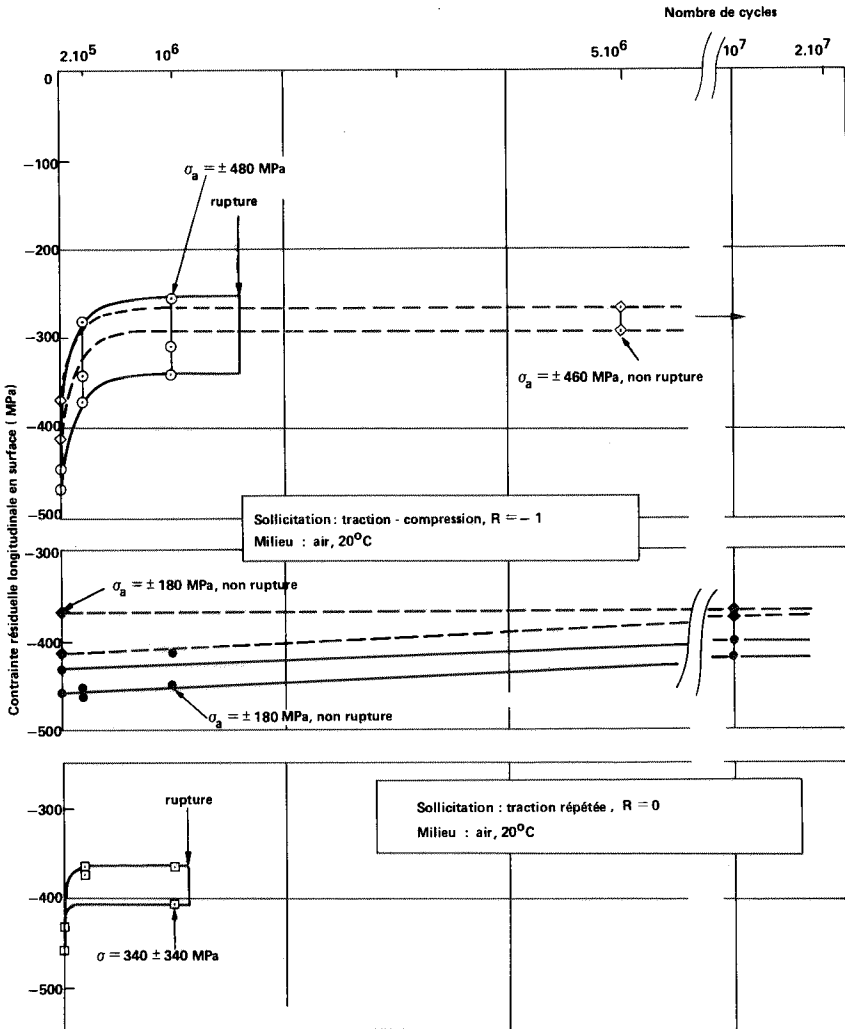


Figure 3 — Evolution des contraintes résiduelles superficielles pendant la durée de vie en fatigue pour l'état de surface n° 7.

comprendre quantitativement cet effet est proposé sur la figure 4. Il explique :

- l'absence de relaxation sous faible sollicitation ou pour une faible contrainte résiduelle initiale ;

- les phénomènes observés sous forte sollicitation pour les différents états de surface, en faisant intervenir les courbes expérimentales d'écroutissement du matériau associées à ces états (courbes correspondant à $\pm 1,4 \%$ d'écroutissement pour l'état n° 3 et à $\pm 3 \%$ pour les états n° 6 et 7).

En traction répétée, un effet de relaxation intervient également lorsque la contrainte maximale du cycle de fatigue dépasse la limite d'élasticité en traction du matériau, ce qui provoque un léger allongement global de l'éprouvette (figure 4 b).

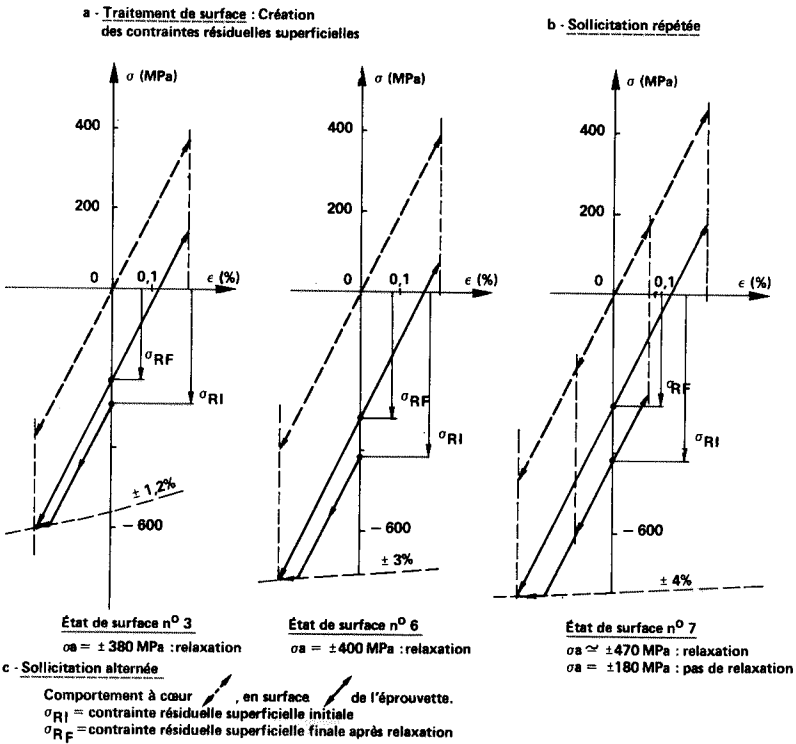
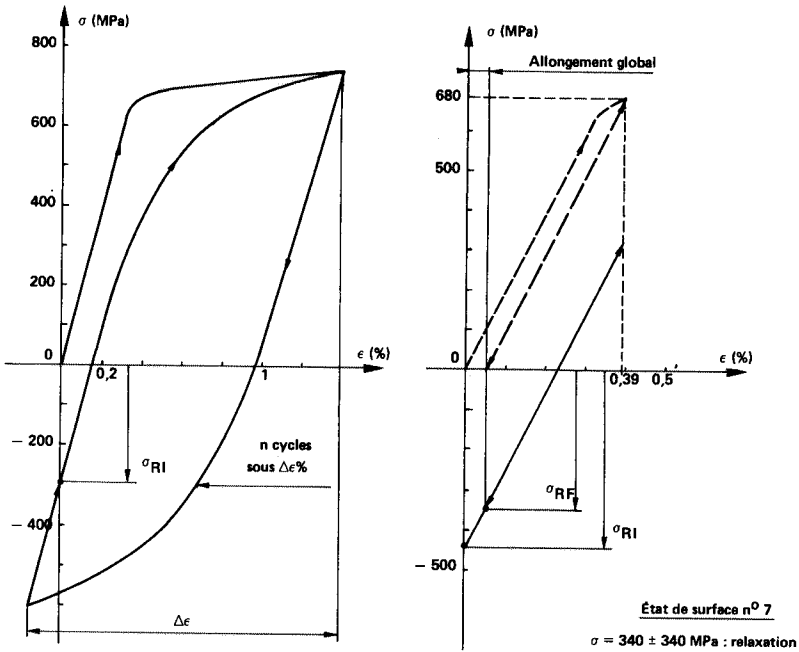


Figure 4 - Comportement schématique d'une éprouvette lors du traitement de surface et sous cyclage de fatigue et évolution des contraintes résiduelles en résultant.

. L'influence des contraintes résiduelles superficielles peut être introduite dans le diagramme de Goodman (figure 5) en y faisant figurer, pour un état donné, d'une part les points représentatifs du comportement global observé, sans tenir compte de ces contraintes, d'autre part le comportement de la surface du matériau en affectant le comportement global d'une contrainte moyenne égale à la contrainte résiduelle superficielle stabilisée. On voit sur cette représentation que les contraintes résiduelles introduites par le grenailage de précontrainte augmentent la limite d'endurance dans l'air en efforts alternés d'environ 160 MPa par rapport à un état de surface de mêmes caractéristiques géométriques sans contraintes résiduelles. Le bénéfice maximal qu'on peut attendre est de l'ordre de 200 MPa sous une contrainte moyenne de 150 MPa.

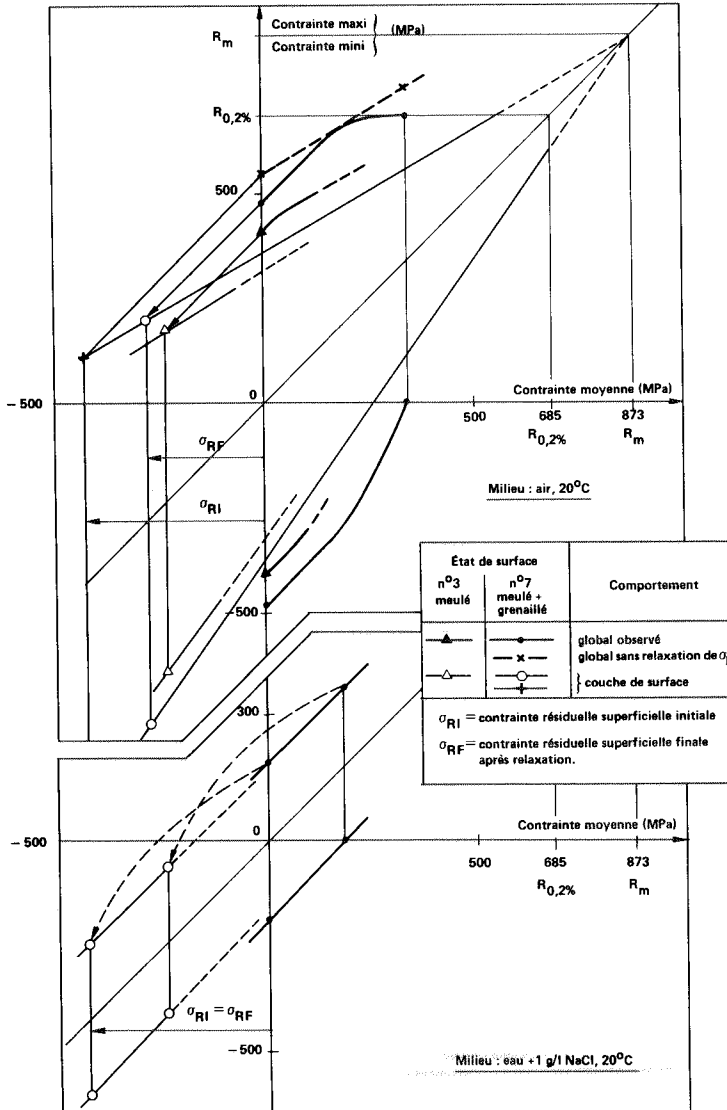


Figure 5 — Illustration de l'effet de contrainte moyenne dû aux contraintes résiduelles superficielles (essais en traction alternée ou répétée).

Sur le même diagramme, on peut également apprécier l'effet de la rugosité géométrique en comparant les points représentatifs à contrainte résiduelle nulle : l'élimination par le grenailage des marques de meulage n'amène qu'une augmentation d'environ 30 MPa de la limite d'endurance.

En eau chlorurée, le même raisonnement (figure 5) montre que le grenailage n'apporte qu'une amélioration assez faible (inférieure à 40 MPa en efforts alternés) du fait de la faible résistance intrinsèque du matériau étudié dans ce milieu.

CONCLUSION

L'influence de différents états de surface sur la tenue à la fatigue et à la fatigue-corrosion a été étudiée sur un acier Z 19 CD 12-1 pour ailetages de turbines à vapeur. Les conclusions suivantes ont été obtenues :

. Malgré les rugosités très différentes, les états de surface poli et meulé étudiés conduisent à des contraintes résiduelles superficielles de compression élevées, de l'ordre de - 300 MPa.

. Le bénéfice attendu du traitement "au tonneau" et surtout du grenailage de précontrainte sur la limite d'endurance a été difficile à dégager du fait de la présence sur l'état meulé de départ de ces contraintes résiduelles de compression. L'effet maximal du grenailage de précontrainte à attendre pour les sollicitations répétées en traction dans l'air à 20°C a toutefois pu être évalué à environ 200 MPa pour une contrainte moyenne de l'ordre de 150 MPa, conditions dans lesquelles aucune relaxation des contraintes résiduelles n'est à craindre. Le bénéfice introduit par le grenailage est en effet essentiellement dû aux contraintes résiduelles, la modification de la rugosité de surface n'intervenant que pour une très faible part (30 MPa). L'amélioration des caractéristiques de fatigue pourrait certainement être plus nette sur une surface ayant subi un meulage sévère et présentant des contraintes résiduelles de traction.

. Le grenailage n'apporte qu'une amélioration assez faible sur les caractéristiques de fatigue en eau chlorurée, qui demeurent assez basses pour l'acier à 13 % de chrome étudié.

REMERCIEMENTS

Les résultats d'essais de fatigue utilisés dans cette étude ont été obtenus en collaboration avec les Sociétés ALSTHOM-ATLANTIQUE (Belfort) et THYSSEN (Remscheid et Krefeld) que nous remercions pour nous avoir autorisés à les mentionner.

REFERENCES

- [1] El-Helieby, Rowe (June 1980). Metals Technology, 221-225.
- [2] Flavenot, J. F., et Skalli, N. CETIM Informations n° 71.
- [3] Flavenot, J. F., Niku-Lari, A. (Mars 1976). CETIM, Note technique n° 15.