

# AMÉLIORATION PAR GRENAILLAGE DE PRÉCONTRAÎNTE DE LA RÉSISTANCE À LA CORROSION SOUS TENSION DE FILS EN ACIER AU CARBONE EN PRÉSENCE D'EAU DE MER CONTENANT DE L'HYDROGENE SULFURE

**B. Le Boucher**

*Institut Français du Pétrole,  
1 et 4, av. Bois Préau, 92506 Rueil Malmaison Cedex, France*

## ABSTRACT

The resistance of high-strength carbon-steel wires to hydrogen cracking due to corrosion by seawater containing hydrogen sulfide is largely improved by shot-peening.

## MOTS CLES

Corrosion sous tension - acier au carbone à haute caractéristique mécanique - eau de mer - hydrogène sulfuré - grenailage de précontrainte.

## INTRODUCTION

Les installations pétrolières de forage et de production en mer peuvent comporter avantageusement des conduites flexibles. Une structure particulière de telles conduites, développées en France, est donnée figure 1. Le centre creux de ce type de conduite est formé d'une carcasse spiralée non étanche a), revêtue d'une gaine étanche b). Sur la gaine sont disposées des couches croisées de fils plats en acier au carbone à haute résistance mécanique obtenue par trempe isotherme et tréfilage à froid, c). Ceux-ci sont recouverts d'une seconde gaine d) en matériau plastique qui assure une étanchéité totale à l'eau de mer. Une déchirure accidentelle de la gaine externe peut amener de l'eau de mer au contact des fils d'acier. La gaine interne, quoique étanche, laisse, comme tous les matériaux plastiques, diffuser les gaz contenus dans le produit pétrolier notamment l'hydrogène sulfuré.

Dans le cas le plus défavorable, les fils d'acier se trouveraient donc au contact d'eau de mer contenant de l'hydrogène sulfuré. Il pourrait en résulter une fissuration des fils soumis à des contraintes de tension en service. Le risque de corrosion sous tension est d'autant plus marqué que les caractéristiques mécaniques de l'acier sont plus élevées. Pour l'éviter on est donc conduit à diminuer les caractéristiques des aciers utilisés, en se limitant à des duretés au plus égales à 22 Rc [1]. Cependant l'emploi d'aciers à hautes caractéristiques mécaniques permettrait d'accroître les pressions de service et de diminuer le poids des flexibles.

On a donc recherché une amélioration de la résistance des fils à hautes caractéristiques par grenailage de précontrainte.

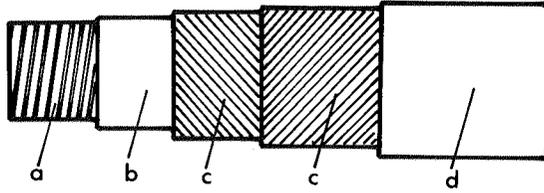


Fig. 1. Structure des conduites flexibles.

#### METHODE EXPERIMENTALE D'ETUDE DE LA CORROSION FISSURANTE

On sait que les aciers à caractéristiques mécaniques élevées peuvent se fissurer dans des solutions contenant de l'hydrogène sulfuré, par exemple dans le milieu NACE [2] de composition suivante : 50 g de chlorure de sodium et 5 g d'acide acétique par litre de solution. La solution est désaérée puis saturée d'hydrogène sulfuré à pression atmosphérique.

Parmi les nombreux travaux effectués dans ce milieu on citera ceux de Grobner, Sponseller et Cias [3]. Ils montrent que la contrainte critique de tension,  $S_c$ , (tension pour laquelle la probabilité de rupture est de 50 %) décroît quand la limite élastique de l'acier croît. Leurs essais reportés en fonction de la dureté Rockwell, montrent que la résistance à la fissuration décroît quand la dureté croît. Le risque de fragilisation semble devenir nul vers 22 Rc ce qui est en accord avec la règle généralement admise.

L'effet de fragilisation dépend non seulement du matériau métallique mais aussi du milieu corrosif. Ainsi Kawashima, Hashimoto et Shimodaira [4] ont montré que la contrainte de rupture décroît quand la concentration en hydrogène dans l'acier doux croît, celle-ci augmente avec l'intensité cathodique. Ils ont aussi trouvé qu'en présence de  $H_2S$  une même polarisation cathodique introduit beaucoup plus d'hydrogène qu'en son absence. Dans certains cas c'est même la totalité de l'hydrogène déchargé cathodiquement qui pénètre dans le métal [5].

La corrosion en présence de  $H_2S$  conduit à une réaction cathodique de dégagement d'hydrogène dont une partie au moins pénétrera dans le métal. Pour un métal donné le risque de fragilisation va alors dépendre des conditions de corrosion. En particulier une vitesse de corrosion accrue conduit à une pénétration d'hydrogène plus grande, donc à un risque de fragilisation accru. Or la vitesse de corrosion peut varier pour un même milieu corrosif suivant l'état de surface initial du matériau métallique. C'est pourquoi, avant d'étudier l'effet du grenailage de précontrainte, on a commencé par rechercher des conditions conduisant à des vitesses de corrosion reproductibles pour un matériau donné avant ou après grenailage.

On a trouvé que ces conditions étaient réalisées en soumettant les fils plats à essayer à un décapage de 90 minutes dans un bain d'acide sulfamique molaire à 20°C.

#### Conditions de grenailage adoptée.

On utilise une grenaille sphérique en acier, norme SAE S 170, dans un appareil à surpression. Les fils plats étudiés ont les caractéristiques suivantes :  
 C : 0,78 ; Mn : 0,73 ; Si : 0,23 ; S : 0,01 ; P : 0,015. Charge à la rupture :

1600 MPa, limite élastique : 0,2 % = 1400 MPa, leur largeur est 6 mm, leur épaisseur 3 mm.

La pression d'air peut varier de 2,5 à 4,2 bar ; le temps de grenailage de 30 sec. à 1 min. pour une longueur de fil de 140 mm. On opère de 10 à 20 cm d'une buse de 6 mm de diamètre. Le grenailage est effectué sur les deux faces successivement. Le grenailage le plus intense correspond à 12 Almen A environ.

#### Conditions de mise sous tension des fils plats.

Le fil est placé entre deux points d'appui distants de 100 mm, tandis qu'un troisième point d'appui central peut être déplacé progressivement pour donner une courbure au fil. La face convexe se trouve alors mise en tension. La tension n'est pas connue avec précision : on se contente de mesurer la flèche correspondant à la courbure du fil. Ce montage est alors mis, à l'abri de l'air, au contact d'eau de mer saturée de  $H_2S$  vers 20°C et on note le temps au bout duquel se produit la rupture. L'eau de mer est préparée suivant la norme ASTM D 1141. Elle est désaérée.

#### RESULTATS

La figure 2 montre la durée de vie des fils en fonction de la flèche appliquée. Pour les fils bruts on voit que la durée de vie croît très vite au-dessous d'une flèche de 5 mm, ce qui correspond à peu près à 70 % de la limite élastique. Avec les fils grenailés, sous 2,5 bar à 10 cm de la buse pendant 1 minute par face, on voit que la durée de vie croît très vite au-dessous d'une flèche de 15 mm, ce qui correspond à peu près à la limite élastique. L'amélioration de résistance à la corrosion fissurante apportée par le grenailage est donc sensible.

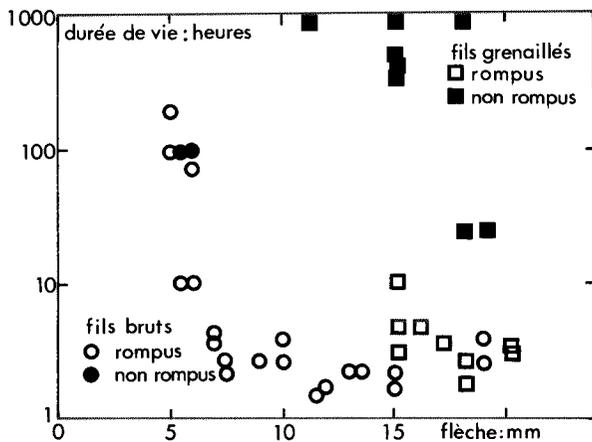


Fig. 2. Amélioration de la résistance à la corrosion fissurante à pH 5,0-5,5 par grenailage.

En vue de relier l'amélioration obtenue à l'état des contraintes dans le fil, on a utilisé la méthode de la flèche décrite par le C E T I M [6]. La forme du fil plat permettait de l'utiliser directement comme une éprouvette Almen. Les résultats obtenus sont indiqués figure 3. On voit que les fils bruts présentent en surface des contraintes de tension. Elles diminuent en fonction de la profondeur et à

partir de 0,7 mm apparaissent des contraintes de compression qui passent par un maximum suivant l'axe du fil.

Après grenailage on voit que des contraintes de compression sont apparues en surface, tandis que les contraintes de tension sous-jacentes sont accrues. Le meilleur comportement à la corrosion fissurante des fils grenailés est donc bien lié à l'apparition de contraintes de compression superficielles.

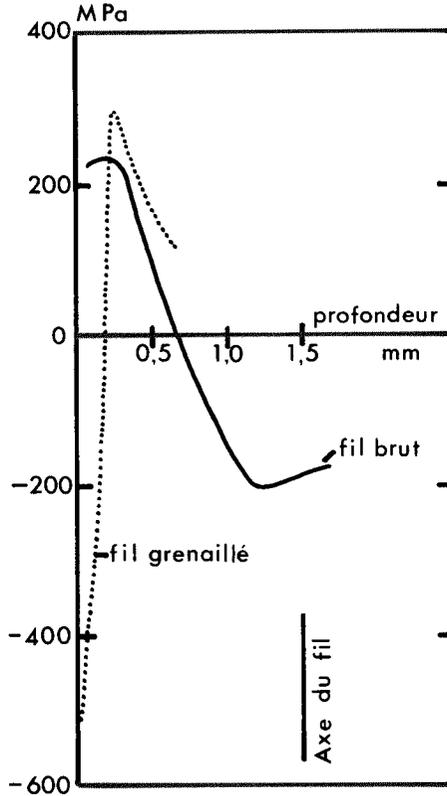


Fig. 3. Répartition des contraintes dans des fils bruts et grenailés.

On a repris ces essais avec un autre lot de fils qui ont été essayés dans un milieu analogue au milieu NACE déjà décrit : à savoir de l'eau de mer ASTM à laquelle on ajoute 0,5 % d'acide acétique, toujours sous une atmosphère de  $H_2S$ . On opère encore vers  $20^\circ C$ .

On peut voir sur la figure 4, que dans ce milieu plus acide la durée de vie des fils bruts ou grenailés est plus courte et l'effet du grenailage est devenu moins sensible. Cependant le grenailage induit bien des contraintes superficielles de compression comme le montre la figure 5 relative à ce nouveau lot de fils.

On s'est aperçu qu'un traitement mécanique des fils pouvait aussi, sans grenailage, améliorer leur comportement, comme on le voit figure 6. Ce traitement a pour

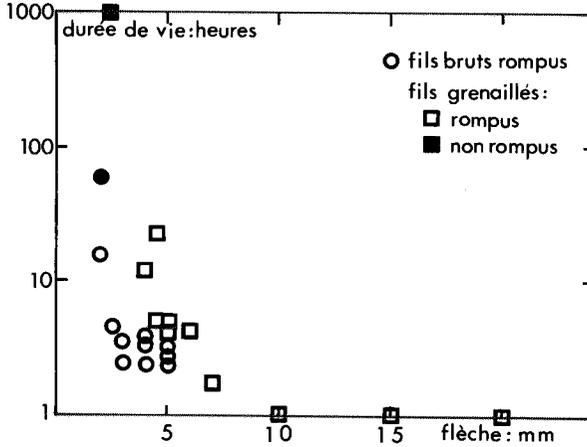


Fig. 4. Diminution de l'effet favorable du grenailage en milieu plus acide (pH = 3,5).

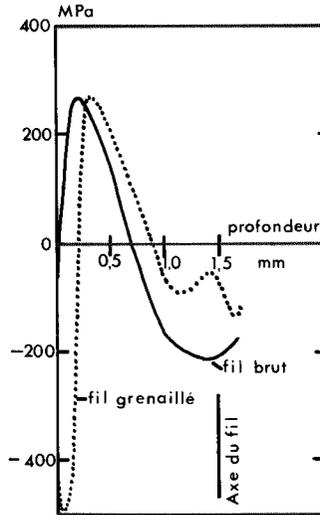


Fig. 5. Répartition des contraintes dans des fils bruts et grenailés.

effet de renverser les contraintes dans le fil ainsi que le montre la fig. 7. En faisant suivre ce traitement d'un grenailage, les contraintes se répartissent comme il est indiqué fig. 8. On voit que les contraintes de tension qui se trouvent normalement sous la zone plastifiée après simple grenailage ont disparu. On obtient ainsi de fortes contraintes de compression jusqu'à des profondeurs importantes dans le fil. Les essais de corrosion montrent fig. 9 que l'on obtient ainsi les meilleurs résultats. Les fils ne se rompent plus en-dessous d'une flèche de 5 mm (environ 70 % de la limite élastique). Dans l'eau de mer saturée de  $H_2S$  sans acide acétique, on n'observe aucune rupture si élevée que soit la flèche.

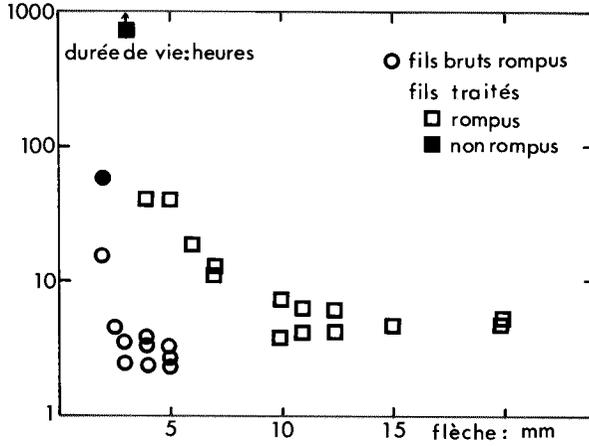


Fig. 6. Effet du traitement mécanique sur la durée de vie des fils.

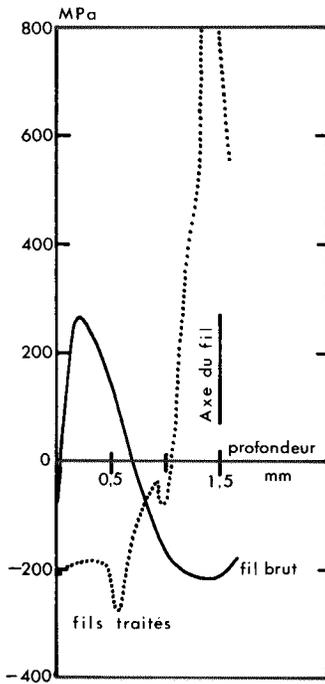


Fig. 7

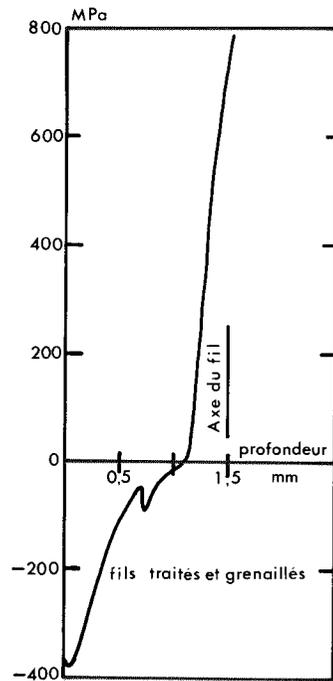


Fig. 8

Fig. 7. Effet du traitement mécanique sur la répartition des contraintes.

Fig. 8. Effet du traitement mécanique suivi d'un grenailage sur la répartition des contraintes.

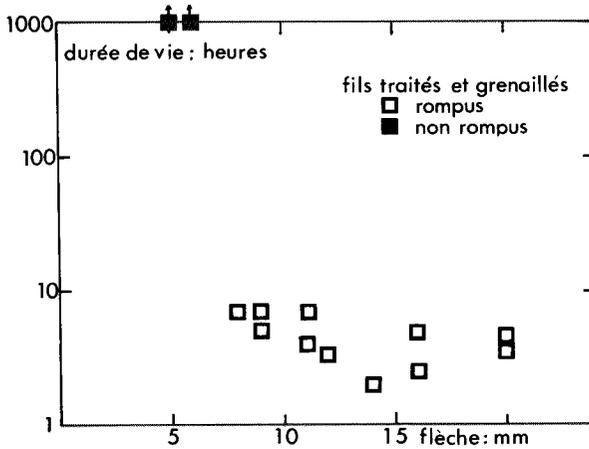


Fig. 9. Amélioration de la durée de vie des fils en milieu acide (pH = 3,5) par traitement mécanique suivi d'un grenailage.

#### CONCLUSION

Les résultats présentés montrent que le grenailage de précontrainte améliore nettement la résistance à la corrosion fissurante de fils plats à hautes caractéristiques mécaniques soumis à des contraintes de tension en eau de mer saturée d'hydrogène sulfuré. Les résultats restent bons, même avec de l'eau de mer saturée en hydrogène sulfuré et acidifiée à pH 3,5 par de l'acide acétique, si l'on fait précéder le grenailage d'un traitement mécanique approprié. Ces traitements permettent d'envisager la fabrication de conduites flexibles tout à fait sûres avec des fils d'acier à hautes caractéristiques mécaniques.

#### BIBLIOGRAPHIE

- 1 NACE Standard MR 01-75. Revision 1980 *in* Mat. Perf. 19, (février 1980).
- 2 NACE Standard TM 01-77. *in* Mat. Perf. 16, (septembre 1977).
- 3 Grobner, P.J., Sponseller, D.L. and Cias, W.W. Development of higher strength H<sub>2</sub>S resistant steels for oil field applications. (Juin 1975), Mat. Perf. p. 35.
- 4 Kawashima, A., Hashimoto, K. and Shimodaira, S. (1976). Hydrogen electrode reaction and hydrogen embrittlement of mild steel in hydrogen sulfide solutions. Corrosion, 32, n° 8, p. 321.
- 5 Le Boucher, B. (1963). Étude du dégagement cathodique de l'hydrogène sur le fer en présence d'hydrogène sulfuré. Revue Inst. Fr. Pétrole, 18, n° 4.
- 6 Flavenot, J.F. and Niku-Lari, A. (sept. 1977). La mesure des contraintes résiduelles. CETIM n° 31.