

Endommagement, par érosion de sable, des structures en acier API 5L X52 destinées aux produits pétroliers

A. ALHUSSEIN^a, J. CAPELLE^a, A. TIDU^b, J. GILGERT^a, Z. AZARI^a

a. Laboratoire de Mécanique Biomécanique, Polymères et Structures (LaBPS), Ile du Saulcy, 57045 METZ
b. Laboratoire d'Etude des Textures et Applications aux Matériaux (LETAM), Ile du Saulcy, 57012 METZ

Résumé :

Nous traitons l'endommagement des structures métalliques destinées à transporter et stocker du gaz et du pétrole, sous impact de sable. Une étude expérimentale, sur éprouvettes entaillées, évalue la perte de masse et la ténacité en fonction du temps de sablage et du rayon d'entaille. Les résultats montrent que la perte de masse augmente avec le temps de sablage, mais la ténacité diminue. Des essais supplémentaires, en fatigue, ont montré l'effet bénéfique du sablage.

Abstract :

The damage of metallic structures which are designed to transport and stock gas and oil is treated. An experimental study on the notched specimens assesses the mass loss and toughness as a function of the sanding time and notch radius. The results show that the mass loss increases with sanding time, but the toughness decreases. The fatigue tests showed the beneficial effect of sandblasting.

Mots clefs : Acier API 5L X52, érosion par sablage, ténacité, fatigue.

1 Introduction

L'érosion est un processus provoqué par un volume érodé sur une surface d'un matériau. Le phénomène d'érosion des structures métalliques, à dérivées pétrolières et soumises au processus de fatigue par impact de sable, est un problème qui concerne de nombreux secteurs industriels. Les chocs entre les particules de sable et la surface des structures causent un endommagement sévère qui se manifeste par des cratères d'écaillage de différentes formes et profondeurs, Hasan et Iqbal [1]. L'épaisseur des parois est réduite et la rupture a lieu quand la contrainte dans les cratères atteint un seuil limite.

Le taux d'érosion augmente en fonction du temps d'exposition jusqu'à une valeur constante, Hattori et Nakao [2]. Ces auteurs ont partagé le phénomène du volume érodé en quatre étapes consécutives : Etape initiale caractérisée par un volume érodé, étape d'incubation (quelques fissures sont observées par accumulation de la déformation plastique), étape d'accélération d'érosion et étape d'érosion maximale. En étudiant l'évolution de l'érosion moyenne sur le temps d'exposition, nombreuses équations ont été obtenues en utilisant des méthodes de mécanique des solides. La plupart contiennent des propriétés du matériau, des propriétés thermodynamiques ou d'autres variables génériques dont certaines peuvent être fondamentales. A partir de 1947 et jusqu'à maintenant, trois formes générales de modélisation d'érosion sont perçues. Des équations empiriques sont construites directement avec les données prises des essais, dans lesquels quelques conditions ont été changées. Quatre modèles typiques sont cités. Barwell [3] a suggéré que l'usure moyenne peut être caractérisée par l'une des trois courbes :

$$V = \frac{\beta}{\alpha} \{1 - \exp(-\alpha t)\} \quad (1)$$

$$V = \alpha t \quad (2)$$

$$V = \beta \exp(\alpha t) \quad (3)$$

Où V : Volume érodé, t : Temps d'exposition, α : Constante et β : Paramètre identifié par les caractéristiques de la surface initiale. Ces équations suffisent pour décrire la forme de la courbe $V = f(t)$ ou $V = f(\beta)$. Rhee [4] a constaté que l'usure totale en friction est fonction de la charge appliquée F , la vitesse v et le temps t :

$$\Delta m = KF^a v^b t^c \quad (4)$$

Où Δm : Masse du matériau érodé, K , a , b et c des constantes empiriques.

Les principaux paramètres d'érosion sont : le temps d'exposition, l'énergie cinétique des particules pour laquelle l'érosion moyenne est proportionnelle à la masse et à la vitesse des particules solides, Wood et al [5], et l'angle d'impact pour lequel le taux d'érosion maximal dépend du comportement du matériau, Bozzini et al [6].

Les actions mécaniques, chimiques et thermiques sont à l'origine de la séparation de la matière, mais les moyens, pour atteindre ces actions, sont différents. Meng et Ludema [7], ont distingué quatre mécanismes principaux de l'érosion par impact des particules solides, figure (1).

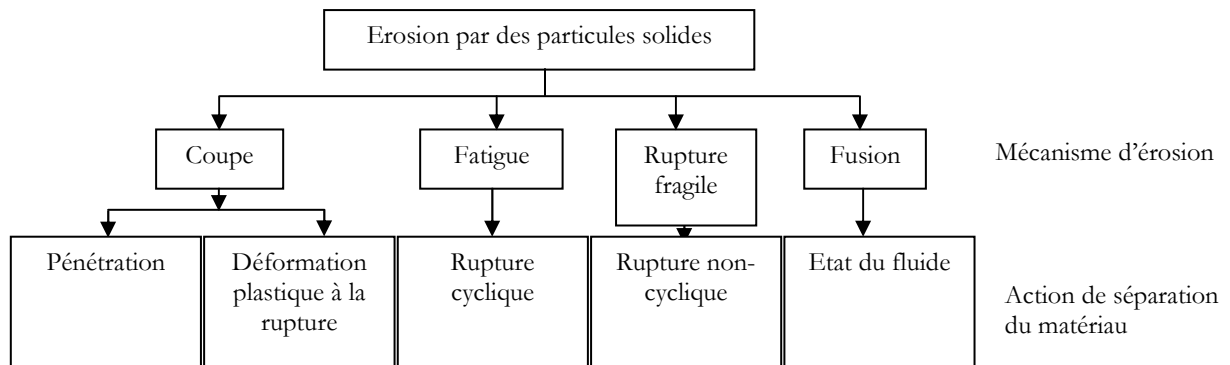


FIG 1 – Mécanismes d'érosion par des particules du sable [7].

Pour déterminer l'influence de l'érosion sur la ténacité du matériau, nous avons réalisé des essais Charpy. La propagation de la fissure a lieu dans l'épaisseur de l'échantillon. Le critère énergétique considère que la ténacité est proportionnelle au travail surfacique de rupture et représente précisément la résilience :

$$K_{CV} = U_r / B.b \quad (5)$$

La ténacité, à l'amorçage, est définie par Turner [8] : $J_{IC} = \eta U_c / B.b = \eta K_{CV}$ (6)

Les valeurs du facteur de proportionnalité η sont déterminées par deux méthodes :

Formule ASTM 813.81 (Norme américaine) : $\eta = 2 + (0.522 b/W)$ (7)

Formule BS norme Britannique : $\eta = 1.97 + (0.518 b/W)$ (8)

Par approximation, J_{IC} est donné par le travail total de rupture, Pluvinage [9] :

$$J_{IC} \cong \frac{2U_c}{Bb} \quad (9)$$

Où J_{IC} est la ténacité, K_{CV} la résilience, U_r l'énergie de rupture, U_c le travail de rupture mesuré à l'amorçage, B l'épaisseur d'échantillon, W la largeur d'échantillon et b la taille du ligament.

Les valeurs de ténacité ont été calculées en appliquant le critère énergétique.

Afin d'étudier la fatigue du matériau, après l'opération de sablage, des essais de fatigue ont été réalisés. Le processus d'érosion par sablage permet d'améliorer la résistance à la fatigue sous contraintes [10,11,12]. L'origine de ce bénéfice vient de l'introduction de contraintes résiduelles de compression au niveau des couches écrouies en surface. Cet état de contrainte se manifeste en réponse à l'incompatibilité des déformations plastiques locales. Cette incompatibilité est compensée par des déformations élastiques permanentes (en l'absence de relaxation), correspondant aux contraintes résiduelles engendrées par l'impact des particules solides. De nombreuses études ont montré l'intérêt du procédé vis-à-vis de la tenue en fatigue. De Los Rios et al [13] ont montré, à titre d'exemple sur des alliages d'aluminium, une amélioration de la limite d'endurance à 10^7 cycles (+12 %). L'origine de cette amélioration est attribuée à l'état de surface qui est meilleur, limitant ainsi les micro-concentrations de contraintes, ce qui engendre des durées d'amorçage plus importantes.

2 Matériau et conditions de sablage

Le but de ce travail est d'étudier l'influence du temps de sablage sur la ténacité et la durée de vie du matériau. Pour cela, nous avons réalisé trois essais principaux : sablage, Charpy et fatigue sur des échantillons en acier X52 entaillés en V, pour différents rayons d'entaille : 0.25, 0.5, 0.75 et 1 mm. Ces échantillons ont été prélevés d'un pipeline dans deux sens : Longitudinal (L) et Transversal (T). Le tableau (1) présente la composition chimique du matériau. Les géométries des échantillons sont présentées, figures (2 et 3).

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	Cu	Ti	Nb	Al
0.22	1.22	0.24	0.16	0.14	0.06	0.036	0.19	0.04	<0.05	0.032

TAB 1 – Composition chimique de l'acier X52

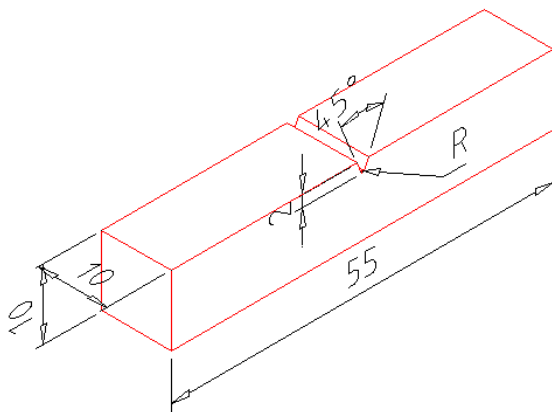


FIG 2 – Géométrie d'échantillon (Essai de Charpy)

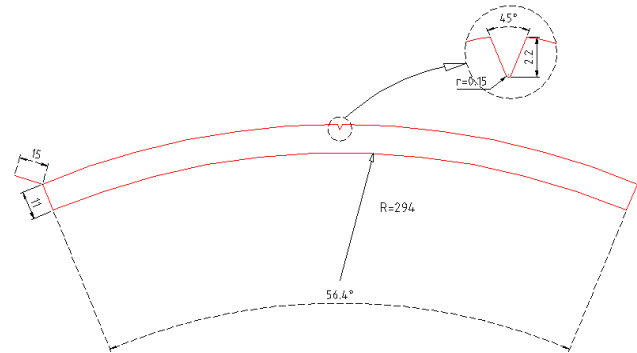


FIG 3 – Géométrie d'échantillon de fatigue

Afin de caractériser statiquement l'acier X52, nous avons préparé plusieurs échantillons découpés dans les deux sens : L et T. La loi de comportement de traction est affichée sur la figure (4) et les propriétés mécaniques dans le tableau(2).

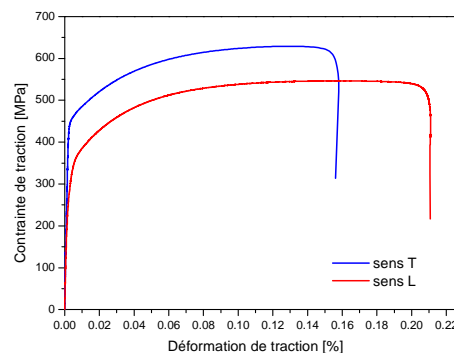


FIG 4 – Loi de comportement de l'acier X52

Type d'échantillon	Module de Young (GPa)	Rm (MPa)	Rp 0.2 (MPa)	A% (%)	Coefficient de Poisson	Charge maxi (kN)	Section (mm ²)	Déformation de traction à Rupture (%)
Sens T	208.03	626.86	450.73	18.51	0.33	19.73	31.45	15.62
Sens L	182.64	547.735	317.915	15.515	0.33	72.32	132.03	21.07

TAB 2 – Propriétés mécaniques de l'acier X52

La faiblesse de la section, dans le sens T, est due à l'épaisseur de l'éprouvette, 4mm.

La base de cette étude est l'évaluation de l'endommagement du matériau par impact du sable. Pour cela, une sableuse Blaster 2700, équipée d'un manomètre permettant d'adapter la puissance désirée, est utilisée, figure (5). L'alimentation du sable (Al₂O₃) se fait par effet venturi, avec un débit de sablage constant durant toute

l'opération. La vitesse du flux d'air, 32 m.s^{-1} , a été mesurée à l'aide d'un anémomètre. Elle représente la vitesse moyenne du vent de sable dans les régions sahariennes. Les propriétés physiques et mécaniques sont présentées respectivement dans les tableaux (3) et (4) :

Composition atomique Al_2O_3	Densité	Taux d'absorption d'eau (%)
>99,9%	3,95	0

TAB 3 – Propriétés physiques du sable (corindon)

Dureté Vickers (HV)	Résistance à la traction (N/mm^2)	Résistance à la flexion (N/mm^2)	Résistance à la compression (N/mm^2)	Module d'Young (N/mm^2)	Coefficient de poisson	Facteur d'Intensité de Contraintes ($\text{Mpa.m}^{1/2}$)
180-200	200-250	200-600	1900-2000	$3.8 \cdot 10^5$	0.25-0.3	4-5

TAB 4 – Propriétés mécaniques du sable (corindon) à 20° C (Données industrielles)

Afin de régler les angles de projection de l'abrasif et de centrer les impacts, nous avons réalisé un montage, figure (6), qui respecte les conditions suivantes : Diamètre de la buse fixé à 8 mm, débit moyen durant les essais d'érosion à environ 1.57 g/s, l'angle d'impact entre le débit de sable et la surface d'échantillon égal à 90°, la distance entre le tube et l'échantillon est fixée à 200 mm, la pression de flux de l'air à 4 bars et enfin la durée de sablage varie entre 60 et 480 min.

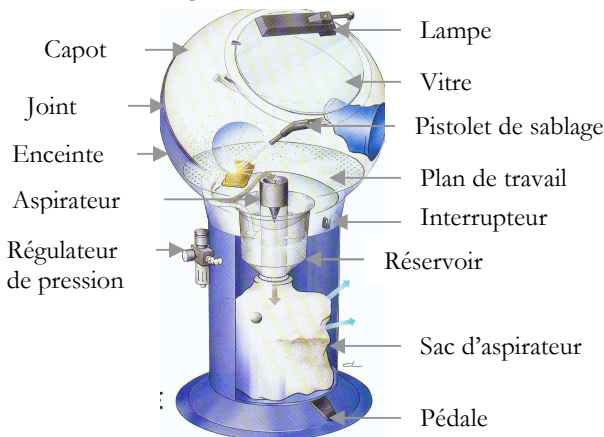


FIG 5 – Sableuse Blaster 2700

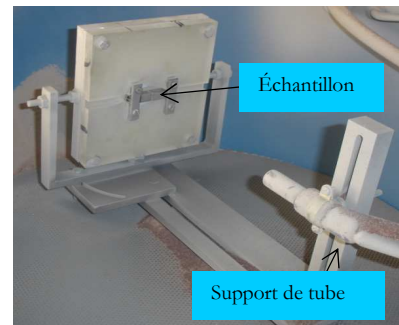


FIG 6 – Montage porte échantillon

3 Résultats et discussions

3.1 Perte de masse

L'étude de perte de masse durant le temps du sablage a été réalisée sur des échantillons Charpy L et T. La variation d'écaillage du matériau, pour différents rayons d'entaille, est présentée sur la figure 7.

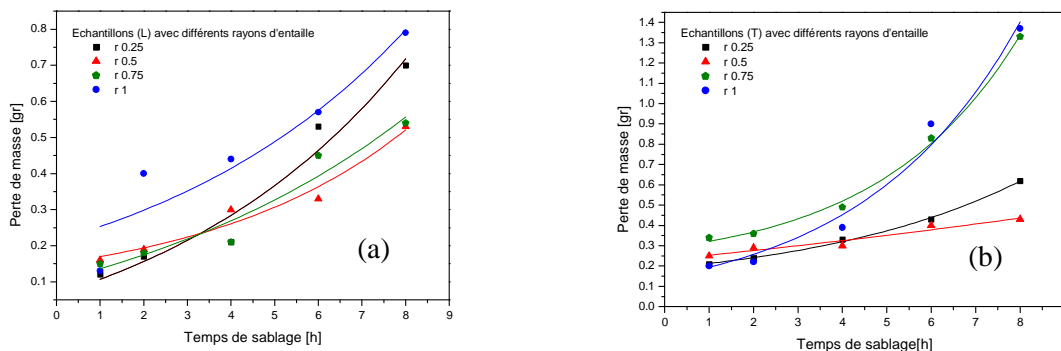


FIG 7 – Evaluation de perte de masse pendant le sablage : a) sens L b) sens T

L'équation mathématique des courbes, présentant l'évolution de perte de masse en fonction du temps de sablage, est exprimée par :

$$\Delta m = \Delta m_0 + a.e^{\frac{t}{c}} \quad (10)$$

Les valeurs des constantes sont présentées sur le tableau 5.

Rayon d'entaille [mm]	Echantillons (L)				Echantillons (T)			
	Δm_0	a	c	R^2	Δm_0	a	c	R^2
0.25	-0.15745	0.22292	5.84857	0.96	0.08606	0.1029	4.87147	0.99
0.50	0.06935	0.08124	4.66143	0.97	-0.28936	0.52062	24.08097	0.94
0.75	-0.12381	0.22687	7.28441	0.94	0.19376	0.09328	3.19348	0.99
1	0	0.21495	6.09622	0.89	0	0.14637	3.54048	0.98

TAB 5 – Valeurs des constantes, équation (10).

3.2 Evolution de la ténacité

La ténacité du matériau est calculée en réalisant l'essai Charpy qui donne l'énergie absorbée à la rupture (exprimée en joules). Pendant l'essai, nous avons respecté les conditions suivantes : Une température ambiante, l'énergie nominale du mouton Charpy est égale à 300 joules, le couteau attaque l'éprouvette dans le plan de symétrie de l'entaille et sur sa surface opposée. Après l'opération de sablage, appliquée sur 48 échantillons Charpy (L et T), pendant différents intervalles du temps : 1, 2, 4, 6 et 8 heures, l'essai Charpy a été réalisé. Nous avons obtenu la variation de l'énergie absorbée à la rupture en fonction du temps de sablage et pour différents rayons d'entaille. En appliquant le critère énergétique, Eq. (9), nous calculons la ténacité, figure (8).

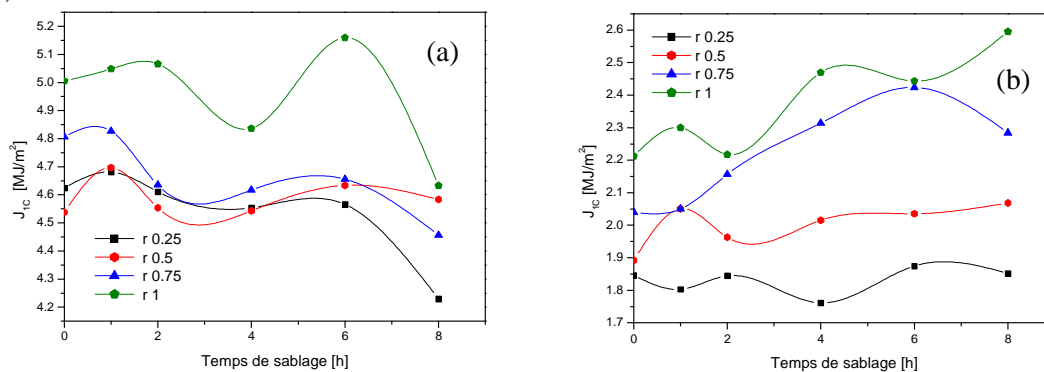


FIG 8 – Variation de la ténacité en fonction du temps de sablage : a) Sens L b) Sens T

Les valeurs de ténacité obtenues sont considérées comme la capacité du matériau à absorber de l'énergie. Nous constatons que cette capacité, sous l'effet du sablage, diminue dans le sens L après une période de temps, à cause des contraintes résiduelles. Nous remarquons aussi que :

1. Chaque échantillon non sablé a une valeur limite de ténacité liée au rayon d'entaille.
2. L'influence du sablage sur la ténacité dans le sens transversal (T) est moins importante. Plus le rayon d'entaille est grand, plus la ténacité augmente.

3.3 Essai de fatigue et estimation de la durée de vie

Nous avons utilisé l'essai de flexion trois points en fatigue, sur des échantillons identiques vierges et sablés pendant huit heures. La charge moyenne appliquée est comprise entre 750 et 2625 N. A partir des résultats, nous traçons la variation de la charge moyenne en fonction du nombre de cycles à rupture, figure (9). Nous constatons que le sablage augmente la durée de vie ; Ceci est dû à deux paramètres :

- i) Les contraintes résiduelles de compression au fond d'entaille.

- ii) La croissance du rayon d'entaille pendant le sablage ; après 8 heures de sablage, le rayon varie de 0.15 à 0.44 mm.
- iii) Pour une charge appliquée de 1500 N, le gain, en durée de vie, pour les éprouvettes sablées est de 48.7 %.

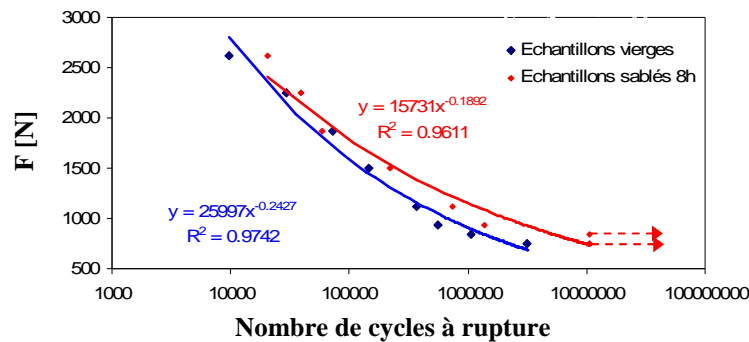


FIG 9 – Evaluation de la durée de vie du matériau vierge et après sablage.

4 Conclusions

Dans cette étude, nous avons évalué l'endommagement, par impact du sable, des structures en acier X52 conçues aux dérivées pétrolières. Trois types d'échantillons ont été retirés de ces structures pour réaliser différents essais : Traction, Charpy et fatigue. Les essais de sablage, réalisés sur ces échantillons entaillés en V, avec différents rayons d'entaille et pour différents intervalles de temps, donnent l'influence du temps de sablage sur la ténacité et sur la durée de vie du matériau. Nous avons constaté :

- Une perte de masse, durant le sablage, dans les deux sens L et T.
- Un temps de sablage néfaste sur la ténacité dans le sens L, mais moins important dans le sens T.
- Un sablage améliore la durée de vie du matériau grâce aux contraintes résiduelles.

Références

- [1] Hasan F., Iqbal J., Consequential rupture of gas pipeline, *Engineering Failure Analysis*, 13, 127-135, 2006.
- [2] Hattori S., Nakao E., Cavitation erosion mechanisms and quantitative evaluation based on erosion particles, *Wear*, 249, 839-845, 2002.
- [3] Barwell F. T., *Wear of metals*, *Wear*, 1, 317-332, 1957-1958.
- [4] Rhee S. K., Wear equation for polymers sliding against metal surfaces, *Wear*, 16, 431-445, 1970.
- [5] Wood R. J. K., Puget Y., Trethewey K. R., Stokes K., The performance of marine coatings and pipe materials under fluid-borne sand erosion, *Wear*, 219, 46-59, 1998.
- [6] Bozzini B., Ricotti M. E., Boniadri M., Mele C., Evaluation of erosion –corrosion in multiphase flow via CFD and experimental analysis, *Wear*, 255, 237-245, 2003.
- [7] Meng H. C., Ludema K. C., Wear models and predictive equations: their form and content, *Wear*, 181-183, 443-457, 1995.
- [8] Turner C. E., Methods for post yield fracture safety assessment, *Post-yield Fracture Mechanics*, 23-210, 1979.
- [9] Pluinage G., *Fracture and fatigue emanating from stress concentrators*, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [10] Lillamand I., Evolution d'une couche grenillée sous sollicitations thermiques et mécaniques, cas de la fatigue oligocyclique, Thèse ENSAM, Décembre 1998.
- [11] Devignes M., Influence du grenillage de précontrainte sur la tenue en fatigue de l'acier 35CD4, thèse ENSAM, Septembre 1987.
- [12] Kirk D., Render P. E., Effects of peening on stress corrosion cracking in carbon steel, ICSP7, Warsaw, Poland, 1999.
- [13] De Los Rios E. R., Artamanov M., Rodopoulos C. A., Peyre P., Levers A., 4th International Committee on Aeronautical Fatigue, Toulouse, pp. 25-29, Juin 2001.