

Mechanical Behavior Of Strands Artificially Damaged Under Static Tensile Tests

A. Tijani^a, M. Meknassi^b, H. Chaffoui^a, M. El Ghorba^b

a. Laboratoire de physique de l'atmosphère, des matériaux et de modélisation, Faculté des Sciences et Techniques de Mohammedia. Université Hassan II de Casablanca

b. Laboratoire de Contrôle et Caractérisation Mécanique des Matériaux et des Structures, École Nationale Supérieure d'Électricité et de Mécanique. Université Hassan II de Casablanca
amaltijani@gmail.com

Résumé :

Dans ce travail, l'effet de la combinaison des modes de dégradation sur les câbles métalliques est investigé. Il est évalué par un modèle de dommage prenant en considération la perte de résistance résiduelle. Les essais expérimentaux sont basés sur une corrosion accélérée et sur un dommage mécanique par rupture de fils. Des essais de traction sont réalisés pour déterminer la résistance résiduelle du matériau endommagé. Ainsi, le dommage linéaire dans le cas de rupture de fils, devient plus agressif dans le cas de torons corrodés. Trois stades de dommage sont définis : (i) initiation du dommage, (ii) dommage progressif et (iii) dommage brutal. Le mode de dégradation combiné est équivalent au dommage cumulatif des deux modes de dégradation pris séparément en stade d'initiation. Une synergie apparaît dans le stade de dommage progressif et dommage brutal où le dommage combiné est plus important que le dommage cumulatif de 20%.

Mots clés : câble, dommage combiné, corrosion, durée de vie, force résiduelle.

1 Introduction

Les câbles métalliques sont présents dans les différents types de construction de ponts : ponts suspendus, ponts à haubans, tablier en béton précontraint. Compte tenu des conditions environnementales dans lesquelles ces ouvrages travaillent, un certain nombre de recherches ont montré que des dommages plus ou moins graves dus à la corrosion apparaissent sur les câbles [7, 2]. En fait, l'acier non allié utilisé pour les câbles a une susceptibilité "ordinaire" à se corroder par dissolution. C'est-à-dire qu'une perte de section plus ou moins homogène peut affecter les fils et entraîner une perte de résistance à la rupture du câble. La dissolution des fils peut également prendre la forme de cratères qui réduisent la contrainte à la rupture et favorisent également la fissuration par fatigue [5]. De plus, les câbles constitutifs ont une limite de fatigue d'endurance qui est fonction de la contrainte moyenne appliquée. Durant leur vie en service, des fils cassés apparaissent dans les câbles. Ainsi, la plupart des normes et des codes quantifient le niveau de dégradation par le nombre de fils rompus [6]. L'étude des phénomènes de corrosion des câbles a été étudiée par de nombreux auteurs. Périer et al se sont intéressés au comportement de fatigue

par frottement des fils d'acier tréfilé dans une solution de chlorure de sodium [9]. Les conditions de contact dans les fils toronnés ont été reproduites sous corrosion pendant l'essai. L'interaction entre les deux mécanismes a été étudiée. Wang a analysé les dommages liés à la fatigue par frottement des fils d'acier dans une mine de charbon dans trois milieux corrosifs [15]. Il a étudié l'effet de l'amplitude de contrainte sur le comportement des fils d'acier tréfilé en fretting fatigue [14].

À d'autres égards, des recherches sur les câbles traitent la rupture des fils. Torkar et Arzensi [13] ont étudié la défaillance d'un câble de grue. Les principales raisons ont été la fatigue et le manque d'inspection. Un modèle de dommage prédisant l'effet des fils rompus a été développé par Beltrán et Williamson [4]. Beltrán et De Vico [3] ont étudié le comportement d'un câble synthétique avec une répartition asymétrique des dommages. Ils ont constaté qu'un dommage symétrique est plus favorable qu'une asymétrie. Sur l'effet des modes de dommages combinés, Takeuchi et al. [11] ont travaillé sur la propagation des fissures en fretting-fatigue corrosion dans des fils de câble de 1,5 mm de diamètre dans l'air et dans l'eau de mer. Une réduction de la durée de vie dans l'eau de mer a été constatée pour des variations de contraintes faibles. De nombreuses expertises sur les ponts mettent en évidence une interaction entre fatigue et corrosion. En effet, l'expertise du pont Aquitaine à Bordeaux [10] a révélé des fissures dont les caractéristiques n'étaient pas celles de la fatigue pure, ni celles de la corrosion par fissuration sous contrainte. Il a été conclu que c'était une combinaison des deux phénomènes. Dans cet article, nous proposons une nouvelle méthode pour étudier l'effet combiné de la corrosion et de la fatigue sur les câbles métalliques. A l'échelle du toron, l'évolution du dommage est définie en fonction de l'évolution du dommage des fils. D'une part, la procédure expérimentale est basée sur la corrosion accélérée par immersion dans de l'acide sulfurique pour différentes durées. D'autre part, le dommage est estimé à partir d'essais de traction sur les torons artificiellement endommagés par rupture de fils et par corrosion accélérée.

2 Méthodologie expérimentale

2.1 Matériel et matériau

Le câble objet de notre recherche est de fabrication Bridon, de type 19x7 (1*7 + 6*7 + 12*7), antigiratoire, de 10 mm de diamètre, galvanisé, à âme métallique. Les composants du câble sont en acier à très haute résistance et de composition chimique faiblement alliée. Les sections de fils sont obtenues par tréfilage, ce qui leur confère leur haute résistance. Les échantillons sont extraits de sections de câble de 300 mm de longueur (200 mm plus 100 mm pour l'amarrage [1]). Les torons et les fils sont issus de la couche extérieure du câble. Les essais de traction sur torons sont réalisés avec une machine "Zwick Roell" avec cellule de charge de 10KN, avec une vitesse d'avancement de 1.5 mm/min [12]. Les caractéristiques mécaniques déterminées à partir des essais de tractions sont représentées dans le tableau 1. La composition chimique obtenue par spectromètre à étincelle est résumée dans le tableau 2.

Force de rupture en N	Module d'Young en GPa	Limite élastique en MPa	Contrainte maximale en MPa	Déformation en %
3770	183	1800	1935	1.87

TABLE 1 – Caractéristiques mécaniques du toron de la couche extérieure

Composition	Fe Fer	C Carbone	Si Silicium	Mn Manganèse	S Soufre	P Phosphore
Pourcentage	Balance	0.8%	0.22%	0.52%	0.018%	0.019%

TABLE 2 – Éléments principaux de la composition chimique du matériau

2.2 Endommagement mécanique des torons

Les torons sont endommagés à différents niveaux par rupture des fils (de 1/7 à 6/7). Dans chaque échantillon, les fils sont rompus manuellement un à un à l'aide d'un épissoir inséré à travers le fil à couper. Ces épissoirs sont généralement utilisés pour l'inspection des fils coupés à l'intérieur des câbles. Le fil à couper est soulevé minutieusement en tournant la pointe de l'épissoir dans la direction de câblage pour le dégager puis il est coupé au moyen d'une pince coupante diagonale.

2.3 Endommagement chimique des torons

La corrosion accélérée est obtenue par immersion de la partie centrale des torons dans une solution acide d'une concentration de 30% H_2SO_4 [8] suivant le schéma indiqué en figure 1. La hauteur de la solution dans le récipient est fixée de manière à obtenir une longueur corrodée de 100 mm pour l'ensemble des éprouvettes. Les torons sont immergés dans la solution acide pour des durées s'étalant de 4h, 8h, 16h, 24h et 36h.

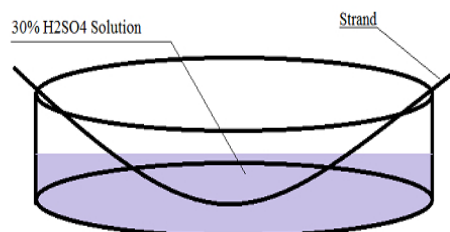


FIGURE 1 – Corrosion des torons

2.4 Endommagement combiné

Afin d'étudier l'effet combiné des deux modes de dégradation décrits précédemment, les éprouvettes endommagées artificiellement par rupture de fils suivant la procédure décrite en 2.2 sont soumises à la corrosion suivant la procédure décrite en 2.3 pour une durée de 8 h.

3 Résultats

3.1 Résultats des essais

Les résultats des essais de traction sur torons endommagés mécaniquement sont représentés dans le tableau 3, ceux des torons avec endommagement par corrosion en tableau 4 et ceux avec endommagement combiné en tableau 5.

Nombre de fils rompus	0	1	2	3	4	5	6
Force ultime résiduelle en N	3770	3300	2800	2430	1970	1620	797

TABLE 3 – Forces ultimes résiduelles des torons endommagés par rupture de fils

Durée de l'attaque corrosive	0	8	16	24	36
Force ultime résiduelle en N	2700	2672	2296	1768	1300

TABLE 4 – Forces ultimes résiduelles des torons endommagés par attaque chimique

Nombre de fils rompus	0	1	2	3	4	5	6
Force ultime résiduelle en N	3130	2600	2240	1767	1024	745	384

TABLE 5 – Forces ultimes résiduelles des torons avec endommagement combiné

3.2 Calcul du dommage

Cette méthode est basée sur une estimation de la perte de résistance par la théorie unifiée (Bui Quoc et al. 1971). L'effet du dommage peut être associé à la résistance résiduelle statique tout aussi bien que la résistance à la fatigue sous chargement cyclique. La théorie unifiée, basée sur la réduction de la limite à la fatigue et la perte de résistance du matériel, exprime la résistance résiduelle limite adimensionnelle σ_{ur}/σ_u en fonction de la fraction de vie β suivant la relation qui suit :

$$\frac{\sigma_{ur}}{\sigma_u} = \left[\gamma - \frac{1}{\frac{1-\beta}{\gamma-1} + \frac{\beta}{\gamma - \left(\frac{\gamma}{\gamma_u}\right)^m}} \right]^{\frac{1}{m}}$$

Où $\gamma = \frac{\sigma}{\sigma_0}$ and $\gamma_u = \frac{\sigma_u}{\sigma_0}$. Ainsi, par analogie, le dommage normalisé peut être exprimé en fonction des forces résiduelles comme suit :

$$D_s = \frac{1 - \frac{F_{ur}}{F_u}}{1 - \frac{F_a}{F_u}}$$

Avec

- F_u la force ultime du matériau original ;
- F_{ur} est la force ultime résiduelle expérimentale. A chaque valeur correspond un nombre de fils rompus ;

- F_a est la force critique correspondant à la force résiduelle du matériau juste avant la rupture du dernier fil ;
- m est une constante du matériau, elle est égale à 8 pour l'acier.

Pour $\beta = 0$ (toron vierge) $\Rightarrow F_{ur} = F_u \Rightarrow D = 0$

Pour $\beta = 1$ (dernier fil rompu) $\Rightarrow F_{ur} = F_a \Rightarrow D = 1$

3.3 Résultats des essais

Le dommage statique des torons endommagés par rupture de fils est représenté en fonction de la fraction de vie β dans la figure 2. La fiabilité statique est déduite par la relation :

$$R_s = 1 - D_s$$

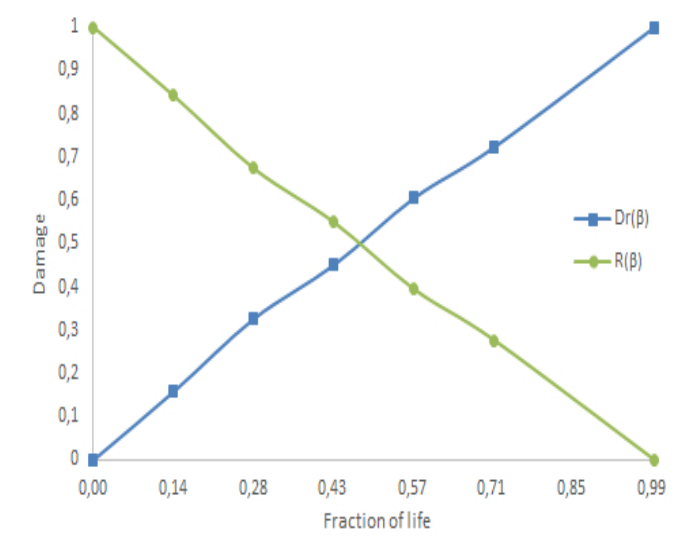


FIGURE 2 – Dommage par la force résiduelle des torons avec fils rompus

Le dommage dû à la rupture de fils est linéaire, il est très proche de la règle linéaire de Palmgren-Miner. De la même manière, les courbes de dommage dans le cas de la corrosion et dans le cas du dommage combiné sont représentées en figures 3 et 4. Il est remarqué que le dommage évolue suivant trois stades définis par :

Stade I : Initiation du dommage

Stade II : Dommage progressif

Stade III : Dommage brutal

Il est remarqué que les courbes de dommage et de fiabilité se croisent à 50% à la fraction de vie de 50% dans le cas de fils rompus, 60% dans le cas du dommage par corrosion et 45% en dommage combiné. La dégradation causée par corrosion évolue lentement en stade I, le dommage devient plus agressif dans les autres stades. Le dommage le plus important est observé pour le dommage combiné. Le stade I, correspondant à la phase d'utilisation normale du composant, est limité à 20% de la fraction de vie dans le cas du dommage combiné en comparaison avec le dommage par corrosion où il s'étend à 40%.

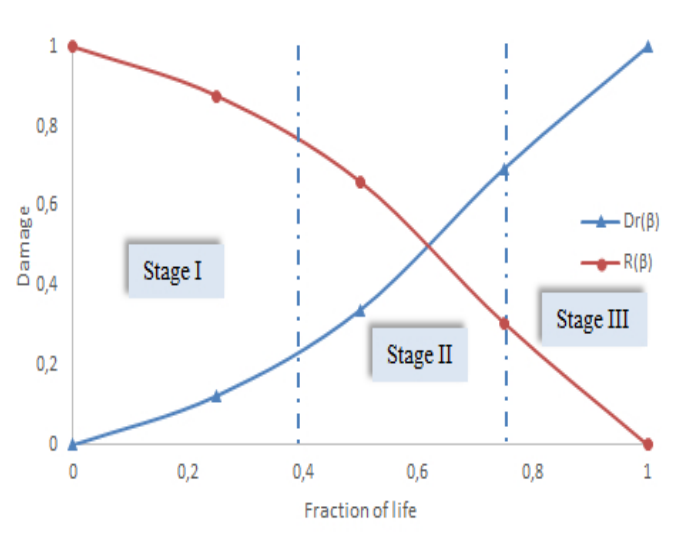


FIGURE 3 – Dommage par la force résiduelle des torons soumis à la corrosion

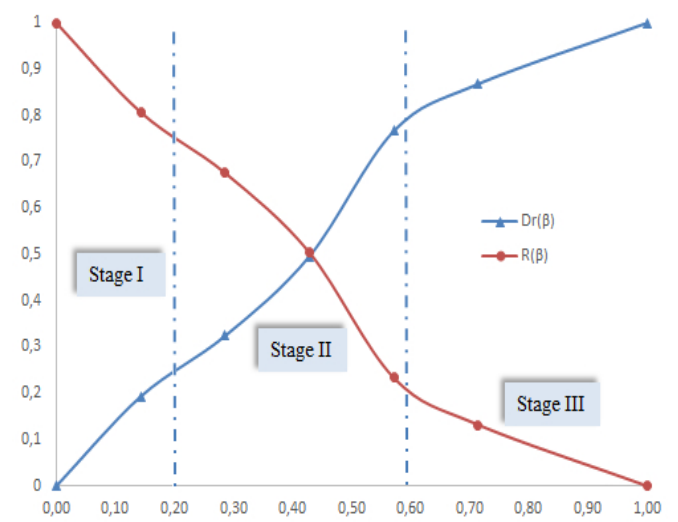


FIGURE 4 – Dommage par la force résiduelle des torons avec endommagement combiné

Effet du dommage cumulatif

Dans cette partie, l'objectif est d'évaluer l'effet de la combinaison des dégradations sur le toron. La valeur du dommage correspondant au temps d'immersion de 8 heures est extraite de la figure ???. Cette valeur du dommage est ajoutée à la valeur du dommage par rupture de fils. Ainsi, le dommage cumulatif est obtenu. Une comparaison entre ce dommage et le dommage combiné est représentée en figure 5. En stade I, correspondant à l'initiation du dommage, il n'y a pas de différence sensible entre le dommage cumulatif et le dommage combiné. A partir du stade du dommage progressif (20% de la fraction de vie), le mode combiné devient plus agressif et induit un dommage plus important que le simple cumul des deux modes de dégradation (jusqu'à 20% de plus à la fraction de vie critique).

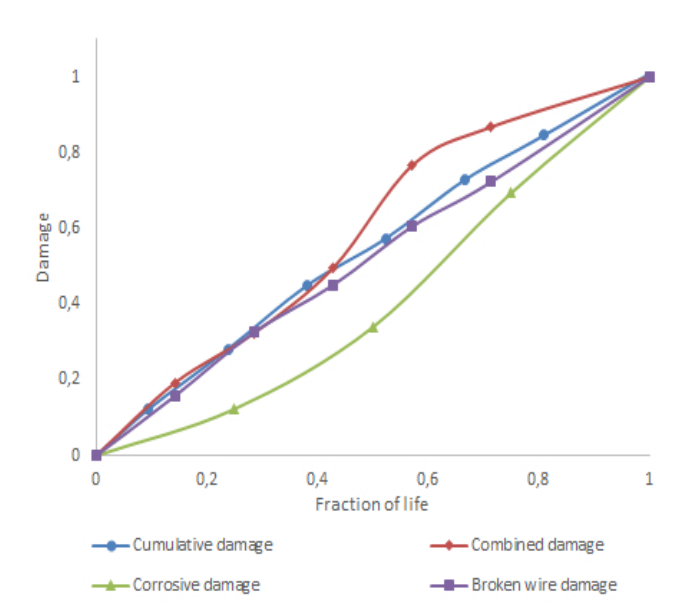


FIGURE 5 – Comparaison du dommage cumulatif et du dommage combiné

Références

- [1] ISO 6892. Matériaux métalliques - essai de traction. *Afnor*, 1984.
- [2] A. Torres Acosta, A. S. Navarro Gutierrez, and J. Teran Guillen. Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 29(6) :1145–1152, 2007.
- [3] J. F. Beltran and E. De Vico. Assessment of static rope behavior with asymmetric damage distribution. *Engineering Structures*, 2015.
- [4] J. F. Beltrán and E. B. Williamson. Numerical procedure for the analysis of damaged polyester ropes. *Eng. Struct.*, 33(5) :1698–1709, 2011.
- [5] P. Brevet. Pathologie des haubans et cables fatigue - corrosion. Technical report, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2005.
- [6] C. R. Chaplin. Failure mechanisms in wire ropes. *Eng. Fail. Anal.*, 2(1) :45–57, 1995.
- [7] L. Dai, L. Wang, J. Zhang, and X. Zhang. A global model for corrosion-induced cracking in prestressed concrete structures. *Engineering Failure Analysis*, 62(April) :263–275, 2016.

- [8] M. Meknassi, N. Mouhib, A. Tijani, and M. El Ghorba. Experimental study of wires extracted from steel wire rope and exposed to sulfuric acid. *Int. J. Mech. Eng. IJME*, 3(11) :47–53, 2015.
- [9] V. Perier, L. Dieng, L. Gaillet, C. Tessier, and S. Fouvry. Fretting-fatigue behaviour of bridge engineering cables in a solution of sodium chloride. *Wear*, 267(14) :308–314, 2009.
- [10] P. Ponthiaux, F. Wenger, and C. Richard. Tribocorrosion. *Techniques de L'ingénieur Frottement et Usure TIB464DUO*, (ref. article : cor60), 2016.
- [11] M. Takeuchi, R. B. Waterhouse, Y. Mutoh, and Y. Satoh. The behaviour of fatigue crack growth in the fretting-corrosion-fatigue of high-tensile roping steel in air and seawater. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 14(1) :69–77, 1991.
- [12] A. Tijani, M. El Ghorba, H. Chaffoui, N. Mouhib, and E. Boudlal. Experimental life prediction of a 1+6 strand extracted from a 19×7 wire rope. *Int. J. Mech. Eng.*, 4(3) :23–29, 2016.
- [13] M. Torkar and B. Arzensek. Failure of crane wire rope. *Engineering Failure Analysis*, 9(2) :227–233, 2002.
- [14] D. Wang, D. Zhang, W. Zhao, and S. Ge. Quantitative analyses of fretting fatigue damages of mine rope wires in different corrosive media. *Mater. Sci. Eng. A*, 596, 2014.
- [15] S. Wang, D. Zhang, K. Chen, L. Xu, and S. Ge. Corrosion fatigue behaviors of steel wires used in coalmine. *Mater. Des.*, 53 :58–64, 2014.